



Licínio Marques da Cruz

Licenciado em Engenharia Civil

**Efeitos estruturais das sobrecargas
rodoviárias definidas das normas mais
utilizadas pela engenharia portuguesa
em tabuleiros vigados de betão**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Doutor António Lopes Batista, Professor
Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologias, da
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Válder Lúcio

Arguente: Prof. Doutor Filipe Santos

Vogal: Prof. Doutor António Lopes Batista

“Copyright” Licínio Marques da Cruz, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologias e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Primeiro tenho que agradecer à minha família, pois sem ela era impossível concluir o curso de Mestrado Integrado de Engenharia Civil e de ser a pessoa em que me tornei.

Depois de agradecer à minha família, em particular aos meus pais e irmã, quero agradecer às pessoas que sem as quais não conseguiria desenvolver a presente tese até ao seu termino, assim passo a individualizar as pessoas que tornaram-na possível:

O Prof. Doutor António Lopes Batista, professor associado da FCT/UNL, pela disponibilidade demonstrada, pelas sugestões evidenciadas, pelas críticas construtivas e resoluções de problemas dadas nesta tese por si orientada.

Os Engenheiros Guilherme Gomes e João Pinho pela sua colaboração na construção dos modelos finitos e de interpretação das normas abordadas, respetivamente, era impossível apresentar os resultados obtidos.

Por fim quero agradecer ao meu amigo Miguel Saraiva pela colaboração nesta obra, uma ajuda indispensável para a conclusão da mesma e do curso.

Por último mas não menos importante quero agradecer a todos os meus amigos e colegas que me apoiaram incondicionalmente no meu percurso académico e escolar e agora terminará.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo analisar os esforços provocados por cinco normas (RSA, EC1-2, AASHTO, SATCC, NBR) em corrente uso pela engenharia portuguesa em sete tabuleiros normalmente utilizados pela engenharia portuguesa.

No âmbito da tese foram abordadas quatro trabalhos publicados que se enquadravam no estudo efetuado na presente tese, em que sucintamente abordam a evolução da regulamentação, comparação entre normas para casos de vigas bi-apoiadas e um outro que desenvolve um método semi-analítico para obter momentos fletor na laje, e de seguida desenvolve uma comparação entre as normas aplicáveis em Portugal (o RSA e o EC-1).

Descreve-se pormenorizadamente e inequivocamente cada norma abordado de forma a que seja muito perceptível e de fácil aplicação, assim aplica-se as sobrecargas impostas aos modelos. Para atingir o objetivo pretendido foi construído sete modelos de elementos finitos, em que as propriedades mecânicas foram preenchidas pelas propriedades conhecidas do betão C30/37, com forma a simular o comportamento estrutural das pontes tipo e proceder ao seu carregamento pelas sobrecargas verticais definidas em cada norma.

Tendo em conta as várias larguras de tabuleiros e comprimento de vão compara-se os esforços máximos de cada norma nas secções de meio vão e de apoio e com base nesses resultados tirar-se-ão conclusões face à evolução dos resultados das normas entre si e com variação das características geométricas da ponte. De referir ainda que os esforços analisados serão os momentos fletores máximos positivos, negativo e esforço transversal numa análise longitudinal e numa análise transversal o momento fletor máximo negativo na consola e na laje em apoio e o momento fletor máximo positivo na laje entre vigas. Por ultimo efetuar-se-á uma comparação entre os resultados obtidos nos modelos numéricos e as tradicionais superfícies de influência para perceber como ocorre a redistribuição de esforços transversais.

Palavras-Chave

Norma	Sobrecarga Vertical	Tabuleiro
Ponte Vigada	Esforço Máximo	Comparação

Abstract

This study aims to analyze the stresses caused by the five norms (RSA, EC1-2, AASHTO, SATCC, NBR) in current use by the Portuguese engineering in seven deck typically used by Portuguese engineering.

In the context of this thesis were discussed four studies published who fit the study conducted in this dissertation, the development of regulations, standards for comparison between cases of two-beams bridge decks and another that develops a semi-analytical method for bending moment the slab, and then develops a comparison between the rules applicable in Portugal (RSA and EC-1).

Describes in detail and every regulation so that it is very noticeable and easy to apply, so apply the overload imposed on the models. To achieve the intended purpose built seven finite element models in which the mechanical properties have been filled by the known properties of the concrete C30/37, to simulate the behavior of the bridges structural type and proceed with the loading of the overload defined in each vertical standard.

Taking into account the different widths of decks and span length compares itself the maximum efforts of each standard in half sections support and based on these results will be taking conclusions regarding the evolution of the results of the rules among themselves and varying the geometric characteristics of the bridge. Note also that efforts will be analyzed the bending moments maximum positive and negative shear in longitudinal analysis and a cross-sectional analysis the maximum negative flexion moment on the console and in the slab support and positive maximum bending moment in the slab between beams. Finally make-up will be a comparison between the results obtained in the numerical models and the traditional areas of influence to see how is the redistribution of transversal forces.

Keywords

Norm	Vertical Overload	Deck
Beam Bridge	Maximum Effort	Comparison

Índice de matérias

Agradecimentos	I
Resumo	III
Abstract	V
Índice de matérias	VII
Índice de figuras	XI
Índice de tabelas	XV
Simbologias e notações	XIX
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 Atualidade e interesse do tema	1
1.2 Definição das ações do tráfego rodoviário	2
1.3 Objetivos do trabalho e meios utilizados	3
1.4 Metodologia utilizada nas comparações e casos de estudos escolhidos	4
1.5 Organização da dissertação	5
Capítulo 2	7
Pesquisa bibliográfica sobre o tema	7
2.1 Considerações gerais	7
2.2 Estudos realizados no LNEC para apoio à elaboração do RSA	8
2.2.1 Objetivos dos estudos	8
2.2.2 Aspetos relevantes dos estudos	8
2.3 Caracterização do tráfego rodoviário e comparação com o RSA e o EC1 (FEUP, 2008)	9
2.3.1 Âmbito e conteúdo do trabalho	9
2.3.2 Caracterização do tráfego rodoviário em trechos de estradas portuguesas	9
2.3.3 Comparação dos efeitos estruturais das sobrecargas em tabuleiros de um vão	9
2.4 Estudo comparativo das sobrecargas rodoviárias de diferentes normas (ISEL, 2012)	10
2.4.1 Âmbito e conteúdo do trabalho	10
2.4.2 Enquadramento e definição nas normas das sobrecargas rodoviárias	10
2.4.3 Comparação dos efeitos das sobrecargas em tabuleiros de um vão	10
2.5 Comparação dos efeitos das sobrecargas rodoviárias do RSA e do EC1 em tabuleiros com duas vigas (IST, 2013).....	11
2.5.1 Âmbito e conteúdo do trabalho	11
2.5.2 Desenvolvimento de métodos semi-analíticos para a análise transversal	11
2.5.3 Comparação dos efeitos das sobrecargas do RSA e do EC1	12
2.5.4 Resultados relevantes do estudo	12
2.6 Comparação das sobrecargas rodoviárias na Holanda e na Eslovénia (O'Brien et al, 2006)	12

2.7 Avaliação do impacto do aumento das sobrecargas nas obras existentes (O'Brien et al, 2008)	13
2.8 Comparação das sobrecargas da norma russa e do EC1 (Lukianenko, 2008)	13
2.9 Aspetos relevantes dos estudos apresentados.....	13
Capítulo 3.....	15
Ações rodoviárias definidas em 5 normas.....	15
3.1 Normas e regulamentos considerados no trabalho	15
3.2 Regulamento português (RSA)	16
3.2.1 Generalidades	16
3.2.2 Veículo tipo	16
3.2.3 Sobrecargas uniforme e linear	17
3.3 Norma europeia (EN 1991 – 2 – 2003).....	18
3.3.1 Generalidades	18
3.3.2 Definição do número de vias.....	18
3.3.3 Modelos de sobrecargas.....	19
3.4 Norma norte-americana (AASHTO LRFD <i>Bridge Design Specifications</i>).....	25
3.4.1 Generalidades	25
3.4.2 Definição do número de vias.....	25
3.4.3 Modelos de sobrecarga	25
3.4.4 Sobrecargas a considerar.....	27
3.4.5 Fator de múltipla presença	28
3.4.6 Fator de amplificação dinâmica.....	28
3.5 Norma sul-africana (SATCC <i>Code of Practice for the Design of Road Bridges and Culverts</i>)	29
3.5.1 Generalidades	29
3.5.2 Definição do número de vias.....	29
3.5.3 Modelos de sobrecarga	29
3.6 Norma brasileira (ABNT NBR 7188)	32
3.6.1 Generalidades	32
3.6.2 Classes das obras.....	32
3.6.3 Modelos de sobrecarga	32
3.6.4 Fator de amplificação dinâmica.....	34
3.7 Comparação genérica de alguns aspetos das normas	34
Capítulo 4.....	35
Escolha dos casos de estudo.....	35
4.1 Considerações gerais	35
4.2 Características idênticas dos modelos numéricos	35
4.3 Caso de estudo 1	36

4.3.1 Caracterização estrutural	36
4.3.2 Modelos de elementos finitos	37
4.4 Caso de estudo 2	41
4.4.1 Caracterização estrutural	41
4.4.2 Modelos de elementos finitos	42
4.5 Caso de estudo 3	45
4.5.1 Caracterização estrutural	45
4.5.2 Modelo de elementos finitos	45
4.6 Caso de estudo 4	46
4.6.1 Caracterização estrutural	46
4.6.2 Modelo de elementos finitos	47
4.7 Caso de estudo 5	48
4.7.1 Caracterização estrutural	48
4.7.2 Modelo de elementos finitos	48
Capítulo 5.....	50
Comparação dos efeitos estruturais devidos às sobrecargas.....	50
5.1 Introdução	50
5.2 Resultados da análise longitudinal.....	50
5.2.1 Generalidades	50
5.2.2 Caso de estudo 1	51
5.2.3 Caso de estudo 2	57
5.2.4 Caso de estudo 3	63
5.2.5 Caso de estudo 4	66
5.2.6 Caso de estudo 5	69
5.2.7 Considerações finais	72
5.3 Resultados da análise na direção transversal.....	73
5.3.1 Generalidades	73
5.3.2 Caso de estudo 1	73
5.3.3 Caso de estudo 2	79
5.3.4 Caso de estudo 3	85
5.3.5 Caso de estudo 4	88
5.3.6 Caso de estudo 5	91
5.3.7 Considerações finais	94
5.4 Análise na direção transversal utilizando superfícies de influência	95

5.4.1 Generalidades	95
5.4.2 Caso de estudo 1	95
5.4.3 Caso de estudo 2	101
5.4.4 Caso de estudo 3	107
5.4.5 Caso de estudo 4	109
5.4.6 Caso de estudo 5	112
5.4.7 Considerações finais	114
Capítulo 6.....	115
Conclusões	115
6.1 Enquadramento da dissertação.....	115
6.2 Escolha dos casos de estudo.....	116
6.3 Resultados obtidos na análise longitudinal.....	116
6.4 Resultados obtidos na análise transversal	118
6.5 Resultados obtidos na análise das superfícies de influência	118
6.6 Perspetivas de desenvolvimentos futuros	119
Referências Bibliográficas.....	121
ANEXOS.....	125
Anexo A1.....	A1 - 1
A1.1 – Caso de estudo 1.....	A1 - 3
A1.2 – Caso de estudo 2.....	A1 - 10
A1.3 – Caso de estudo 3.....	A1 - 17
A1.4 – Caso de estudo 4.....	A1 - 21
A1.5 – Caso de estudo 5.....	A1 - 25
Anexo A2.....	A2 - 1
A2.1 – Caso de estudo 1.....	A2 - 3
A2.2 – Caso de estudo 2.....	A2 - 34
A2.3 – Caso de estudo 3.....	A2 - 64
A2.4 – Caso de estudo 4.....	A2 - 76
A2.5 – Caso de estudo 5.....	A2 - 88

Índice de figuras

Figura 1.1 – Panorama geral da utilização dos eurocódigos estruturais nos países da Europa, em setembro de 2010 [Pinto, 2010].	1
Figura 1.2 – Histogramas com a frequência relativa do peso dos camiões numa estrada de velocidade limitada em Auxerre (França) e na autoestrada M4 da República da Irlanda [Croce e Malakatas, 2010].	3
Figura 3.1 – Configuração em planta do veículo tipo do RSA	16
Figura 3.2 – Sobrecargas uniforme e linear do RSA num tabuleiro da classe I	17
Figura 3.3 – Exemplo genérico da divisão de um tabuleiro em vias fictícias, segundo o EC1	18
Figura 3.4 – Exemplo genérico do carregamento LM1 nas vias fictícias de um tabuleiro	20
Figura 3.5 – Disposição em planta dos veículos do LM1 para verificações locais	20
Figura 3.6 – Modelo de carga 2 (Load Model 2 – LM2)	20
Figura 3.7 – Veículo especial composto por 4 eixos com peso de 150 kN/eixo	21
Figura 3.8 – Veículo especial composto por 6 eixos com peso de 150 kN/eixo	21
Figura 3.9 – Veículo especial composto por 6 eixos com peso de 200 kN/eixo	21
Figura 3.10 – Veículo especial composto por 8 eixos com peso de 150 kN/eixo	21
Figura 3.11 – Veículo especial composto por 7 eixos com peso de 200 kN/eixo, mais um eixo de peso igual a 100 kN	22
Figura 3.12 – Veículo especial composto por 10 eixos com peso de 150 kN/eixo	22
Figura 3.13 – Veículo especial composto por 12 eixos com peso de 150 kN/eixo	22
Figura 3.14 – Veículo especial composto por 9 eixos com peso de 200 kN/eixo	22
Figura 3.15 – Veículo especial composto por 10 eixos com peso de 240 kN/eixo	22
Figura 3.16 – Veículo especial composto por 12 eixos com peso de 200 kN/eixo	23
Figura 3.17 – Veículo especial composto por 12 eixos com peso de 200 kN/eixo	23
Figura 3.18 – Veículo especial composto por 15 eixos com peso de 200 kN/eixo	23
Figura 3.19 – Veículo especial composto por 15 eixos com peso de 200 kN/eixo	23
Figura 3.20 – Veículo especial composto por 12 eixos com peso de 240 kN/eixo, mais um eixo de peso igual a 120 kN	23
Figura 3.21 – Veículo especial composto por 18 eixos com peso de 200 kN/eixo	24
Figura 3.22 – Veículo especial composto por 15 eixos com peso de 240 kN/eixo	24
Figura 3.23 – Veículo especial composto por 18 eixos com peso de 200 kN/eixo	24
Figura 3.24 – Representação do veículo HS20-44, em planta e na direção longitudinal	26
Figura 3.25 – Representação do veículo H20-44, em planta e na direção longitudinal	26
Figura 3.26 – Exemplo de distribuição da sobrecarga uniforme nas direções transversal e longitudinal de um tabuleiro genérico com duas vias de largura w_{via} superior a 3,05 m	27
Figura 3.27 – Modelo de sobrecargas constituído pelo veículo HS20-44 e pela sobrecarga uniforme q_u num tramo apoiado	27
Figura 3.28 – Modelo de sobrecargas constituído pelo veículo H20-44 e pela sobrecarga uniforme q_u num tramo apoiado	27
Figura 3.29 – Exemplo da distribuição das cargas para cálculo do momento negativo máximo, considerando a AASHTO	28
Figura 3.30 – Carregamento do tipo NA (1) num tabuleiro genérico	30
Figura 3.31 – Geometria do veículo do modelo NB da SATCC	31
Figura 3.32 – Modelo de sobrecarga NC (carga distribuída de 30 kN/m ²)	32
Figura 3.33 – Planta dos veículos das classes 45 e 30 da ABNT	33
Figura 3.34 – Planta do veículo da classe 12 da ABNT	33
Figura 3.35 – Configuração em planta das sobrecargas na faixa de rodagem, bermas e nos passeios, segundo a ABNT	33
Figura 4.1 – Ilustração de um constraint do tipo body no programa de cálculo SAP2000®, representando o eixo da viga e o folheto médio da laje	36

Figura 4.2 – Ilustração dos apoios utilizados	36
Figura 4.3 – Secção transversal do tabuleiro do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 25,00 m.....	37
Figura 4.4 – Secção transversal do tabuleiro do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 40,00 m.....	37
Figura 4.5 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 25,00 m. Perspetiva global.....	38
Figura 4.6 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 25,00 m. Vista dos elementos de casca em planta.....	38
Figura 4.7 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 25,00 m. Vista dos elementos de barra em planta.	38
Figura 4.8 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 40,00 m. Perspetiva global.....	39
Figura 4.9 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 40,00 m. Vista dos elementos de casca em planta.....	39
Figura 4.10 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 40,00 m. Vista dos elementos de barra em planta.	39
Figura 4.11 – Secção transversal do tabuleiro do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 25,00 m.....	41
Figura 4.12 – Secção transversal do tabuleiro do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 40,00 m.....	42
Figura 4.13 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 25,00 m. Perspetiva global.....	42
Figura 4.14 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 25,00 m. Vista dos elementos de barra em planta.	42
Figura 4.15 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 25,00 m. Vista dos elementos de barra em planta.	43
Figura 4.16 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 40,00 m. Perspetiva global.....	44
Figura 4.17 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 40,00 m. Vista dos elementos de casca em planta.....	44
Figura 4.18 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 40,00 m. Vista dos elementos de barra em planta.	44
Figura 4.19 – Secção transversal do tabuleiro do caso de estudo 3.....	45
Figura 4.20 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 3. Vista global.....	46
Figura 4.21 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 3. Vista dos elementos de casca em planta.	46
Figura 4.22 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 3. Vista dos elementos de barra em planta.	46
Figura 4.23 – Secção transversal do tabuleiro do caso de estudo 4.....	47
Figura 4.24 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 4. Perspetiva global.	47
Figura 4.25 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 4. Vista dos elementos de casca em planta.	47
Figura 4.26 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 4. Vista dos elementos de barra em planta.	48
Figura 4.27 – Secção transversal do tabuleiro do caso de estudo 5.....	48
Figura 4.28 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 5. Perspetiva global.	49
Figura 4.29 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 5. Vista dos elementos de casca em planta.	49
Figura 4.30 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 5. Vista dos elementos de barra em planta.	49
Figura 5.1 – Momentos negativos para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.	52
Figura 5.2 – Momentos positivos para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.	52
Figura 5.3 – Esforços transversos para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.	53
Figura 5.4 – Momentos negativos para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.	55
Figura 5.5 – Momentos positivos para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.	55
Figura 5.6 – Esforços transversos para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.	56
Figura 5.7 – Momentos negativos para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.	58

Figura 5.8 – Momentos positivos para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.	58
Figura 5.9 – Esforços transversos para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.	59
Figura 5.10 – Momentos negativos para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.	61
Figura 5.11 – Momentos positivos para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.	61
Figura 5.12 – Esforços transversos para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.	62
Figura 5.13 – Momentos negativos para o caso de estudo 3.	64
Figura 5.14 – Momentos positivos para o caso de estudo 3.	64
Figura 5.15 – Esforços transversos para o caso de estudo 3.	65
Figura 5.16 – Momentos negativos para o caso de estudo 4.	67
Figura 5.17 – Momentos positivos para o caso de estudo 4.	67
Figura 5.18 – Esforços transversos para o caso de estudo 4.	68
Figura 5.19 – Momentos negativos para o caso de estudo 5.	70
Figura 5.20 – Momentos positivos para o caso de estudo 5.	70
Figura 5.21 – Momentos negativos para o caso de estudo 5.	71
Figura 5.22 – Momentos negativos na laje interior para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.	74
Figura 5.23 – Momentos positivos na laje interior para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.	75
Figura 5.24 – Momentos negativos na consola para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.	75
Figura 5.25 – Momentos negativos na laje interior para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.	77
Figura 5.26 – Momentos positivos na laje interior para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.	77
Figura 5.27 – Momentos negativos na laje em consola para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.	78
Figura 5.28 – Momentos negativos na laje interior para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.	80
Figura 5.29 – Momentos positivos na laje interior para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.	80
Figura 5.30 – Momentos negativos na laje em consola para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.	81
Figura 5.31 – Momentos negativos na laje interior para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.	83
Figura 5.32 – Momentos positivos na laje interior para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.	83
Figura 5.33 – Momentos negativos na laje em consola para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.	84
Figura 5.34 – Momentos negativos na laje interior para o caso de estudo 3.	86
Figura 5.35 – Momentos positivos na laje interior para o caso de estudo 3.	86
Figura 5.36 – Momentos negativos na laje em consola para o caso de estudo 3.	87
Figura 5.37 – Momentos negativos na laje interior para o caso de estudo 4.	89
Figura 5.38 – Momentos positivos na laje interior para o caso de estudo 4.	89
Figura 5.39 – Momentos negativos na laje em consola para o caso de estudo 4.	90
Figura 5.40 – Momentos negativos na laje interior para o caso de estudo 5.	92
Figura 5.41 – Momentos positivos na laje interior para o caso de estudo 5.	92
Figura 5.42 – Momentos negativos na laje em consola para o caso de estudo 5.	93
Figura 5.43 – Momentos negativos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.	96
Figura 5.44 – Momentos positivos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.	97

Figura 5.45 – Momentos negativos na laje em consola, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.	97
Figura 5.46 – Momentos negativos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.	99
Figura 5.47 – Momentos positivos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.	99
Figura 5.48 – Momentos negativos na laje em consola, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.	100
Figura 5.49 – Momentos negativos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.	102
Figura 5.50 – Momentos positivos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.	102
Figura 5.51 – Momentos negativos na consola, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.	103
Figura 5.52 – Momentos negativos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.	105
Figura 5.53 – Momentos positivos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.	105
Figura 5.54 – Momentos negativos na consola, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.	106
Figura 5.55 – Momentos negativos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 3.	108
Figura 5.56 – Momentos positivos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 3.	108
Figura 5.57 – Momentos negativos na consola, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 3.	109
Figura 5.58 – Momentos negativos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 4.	110
Figura 5.59 – Momentos positivos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 4.	111
Figura 5.60 – Momentos negativos na consola, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 4.	111
Figura 5.61 – Momentos negativos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 5.	113
Figura 5.62 – Momentos positivo na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 5.	113
Figura 5.63 – Momentos negativos na consola, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 5.	114

Índice de tabelas

Tabela 3.1 – Carga e dimensões das rodas do veículo tipo do RSA	16
Tabela 3.2 – Valores das sobrecargas uniforme e linear do RSA.....	17
Tabela 3.3 – Número e largura das vias do EC1	18
Tabela 3.4 – Valores característicos dos subsistemas de sobrecargas TS e UDL do EC1	19
Tabela 3.5 – Fatores de correção α_Q e α_q para as diferentes vias fictícias (proposta do Anexo Nacional do EC1).....	19
Tabela 3.6 – Número e largura das vias da AASHTO.....	25
Tabela 3.7 – Fator de múltipla presença da AASHTO	28
Tabela 3.8 – Fator de amplificação dinâmica da AASHTO	28
Tabela 3.9 – Definição do número de vias fictícias na SATCC.....	29
Tabela 3.10 – Valor característico da carga NA (1) na SATCC	30
Tabela 3.11 – Dimensões do veículo NC.....	32
Tabela 3.12 – Cargas dos veículos distribuídas da ABNT	32
Tabela 3.13 – Características dos veículos definidos na ABNT	33
Tabela 4.1 – Propriedades das vigas do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 25,00 m.	38
Tabela 4.2 – Propriedades das lajes na secção transversal do tabuleiro do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 25,00 m.....	39
Tabela 4.3 – Propriedade das vigas do tabuleiro do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 40,00 m.....	40
Tabela 4.4 – Propriedades das lajes na secção transversal do tabuleiro do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 40,00 m.....	40
Tabela 4.5 – Propriedades das vigas do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 25,00 m.	43
Tabela 4.6 – Propriedades das lajes na secção transversal do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 25,00 m.	43
Tabela 4.7 – Propriedades das lajes na secção transversal do tabuleiro do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 40,00 m.....	44
Tabela 4.8 – Propriedades das vigas do tabuleiro do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 40,00 m.....	45
Tabela 4.9 – Propriedades das vigas do tabuleiro do caso de estudo 3.....	46
Tabela 4.10 – Propriedades das vigas do tabuleiro do caso de estudo 4	48
Tabela 4.11 – Propriedades das vigas do tabuleiro do caso de estudo 5.....	49
Tabela 5.1 – Esforços máximos do para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.....	51
Tabela 5.2 – Esforços máximos para cada norma e sua relação com o RSA, no caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.....	52
Tabela 5.3 – Esforços máximos para caso o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente....	54
Tabela 5.4 – Esforços máximos para cada norma e sua relação com o RSA, no caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.....	55
Tabela 5.5 – Esforços máximos para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.	57
Tabela 5.6 – Esforços máximos para cada norma e sua relação com o RSA, no caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.....	58
Tabela 5.7 – Esforços máximos para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.	60
Tabela 5.8 – Esforços máximos para cada norma e sua relação com o RSA, no caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.....	61
Tabela 5.9 – Esforços máximos para o caso de estudo 3.....	63
Tabela 5.10 – Esforços máximos para cada norma e sua relação com o RSA, no caso de estudo 3.	64
Tabela 5.11 – Esforços máximos para o caso de estudo 4.....	66
Tabela 5.12 – Esforços máximos para cada norma e sua relação com o RSA, no caso de estudo 4.	67
Tabela 5.13 – Esforços máximos do caso de estudo 5.....	69

Tabela 5.14 – Esforços máximos para cada norma e sua relação com o RSA, no caso de estudo 5.	70
Tabela 5.15 – Momentos fletores máximos do caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.	73
Tabela 5.16 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de meio vão e sua relação com o RSA, no caso de estudo 1, na variante de 25,00 m vão correntes.	74
Tabela 5.17 – Momentos máximos para cada norma na secção de apoio e a relação com o RSA, no caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.	74
Tabela 5.18 – Momentos fletores máximos do caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.	76
Tabela 5.19 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de meio vão e sua relação com o RSA, no caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.	76
Tabela 5.20 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de apoio e sua relação com o RSA, caso de estudo 1, na variante de 40,00 m de vão corrente.	77
Tabela 5.21 – Momentos fletores máximos do caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.	79
Tabela 5.22 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de meio vão e sua relação com o RSA, no caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.	79
Tabela 5.23 – Momentos fletores para cada norma na secção de apoio e sua relação com o RSA, no caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.	80
Tabela 5.24 – Momentos fletores máximos do caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.	82
Tabela 5.25 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de meio vão e sua relação com o RSA, no caso de estudo 2, na variante de 40,00 m de vão correntes.	82
Tabela 5.26 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de apoio e a sua relação com o RSA, no caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.	83
Tabela 5.27 – Momentos fletores máximos do caso de estudo 3.	85
Tabela 5.28 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de meio vão e sua relação com o RSA, do caso de estudo 3.	85
Tabela 5.29 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de apoio e sua relação com o RSA, do caso de estudo 3.	86
Tabela 5.30 – Momentos fletores máximos do caso de estudo 4.	88
Tabela 5.31 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de meio vão e sua relação com o RSA, do caso de estudo 4.	88
Tabela 5.32 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de apoio e sua relação com o RSA, do caso de estudo 4.	89
Tabela 5.33 – Momentos fletores máximos do caso de estudo 5.	91
Tabela 5.34 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de meio vão e sua relação com o RSA, do caso de estudo 5.	91
Tabela 5.35 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de apoio e sua relação com o RSA, do caso de estudo 5.	92
Tabela 5.36 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente, e diferença para os resultados numéricos na secção de meio vão.	95
Tabela 5.37 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente, e diferença para os resultados numéricos na secção de apoio.	96
Tabela 5.38 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente, e diferença para os resultados numéricos na secção de meio vão.	98
Tabela 5.39 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente, e diferença para os resultados numéricos na secção de apoio.	98
Tabela 5.40 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente, e diferença para os resultados numéricos na secção de meio vão.	101

Tabela 5.41 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente, e diferença para os resultados numéricos na secção de apoio.	101
Tabela 5.42 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente, e diferença para os resultados numéricos na secção de meio vão.	104
Tabela 5.43 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente, e diferença para os resultados numéricos na secção de apoio.	104
Tabela 5.44 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 3, e diferença para os resultados numéricos na secção de meio vão.	107
Tabela 5.45 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 3, e diferença para os resultados numéricos na secção de apoio.	107
Tabela 5.46 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 4, e diferença para os resultados numéricos na secção de meio vão.	109
Tabela 5.47 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 4, e diferença para os resultados numéricos na secção de apoio.	110
Tabela 5.48 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 5, e diferença para os resultados numéricos na secção de meio vão.	112
Tabela 5.49 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 5, e diferença para os resultados numéricos na secção de apoio.	112

Simbologias e notações

a	Dimensão longitudinal da roda do Veículo Tipo do RSA
AASHTO	AASHTO LRFD <i>Bridge Design Specifications</i> (Norma norte-americana)
ABNT	ABNT NBR 7188 (Norma brasileira)
b	Dimensão transversal da roda do Veículo Tipo do RSA
b_x	Dimensões transversais b_1 , b_2 e b_3 das rodas dos veículos da ABNT
EC1	EN 1991 – 2 – 2003 (Norma Europeia)
L	Comprimento do vão contínuo carregado
<i>Lane Load</i>	Subsistema definido na AASHTO constituído por cargas uniformemente distribuídas
LM1	Modelo de sobrecarga <i>Load Model 1</i> definido no EC1
LM2	Modelo de sobrecarga <i>Load Model 2</i> definido no EC1
LM3	Modelo de sobrecarga <i>Load Model 3</i> definido no EC1
LM4	Modelo de sobrecarga <i>Load Model 4</i> definido no EC1
m	Fator de múltipla presença a aplicar nos veículos descritos na AASHTO
m^+	Momento fletor positivo máximo na laje entre vigas na direção transversal
m^-	Momento fletor negativo máximo na laje entre vigas na direção transversal
m_{consola}	Momento fletor negativo máximo na laje em consola
M^+	Momento fletor máximo positivo na direção longitudinal
M^-	Momento fletor máximo negativo na direção longitudinal
n	Número de vias fictícias
NA – (1)	Subsistema definido na SATCC constituído por cargas de faixa longitudinais
NA – (2)	Subsistema definido na SATCC constituído por cargas concentradas
NA – (3)	Sistema definido na SATCC constituído por um veículo de 1 eixo de 2 rodas
NB	Sistema definido na SATCC constituído por 24/36 veículos de 4 eixos de 4 rodas
NC	Sistema definido na SATCC constituído por um veículo de características especiais
p	Peso da carga uniforme distribuída definida na ABNT

Q	Peso de uma roda do VT do RSA
q_1	Peso da SL do RSA
q_2	Peso da SU do RSA
Q_{ik}	Peso de cada eixo que constitui o veículo TS do LM1 em cada via i
q_{ik}	Peso do subsistema UDL em cada via i
q_u	Peso do subsistema <i>Lane Load</i> definido na AASHTO em cada via fictícia
Q_a	Peso do subsistema NA (1) em cada via fictícia
RSA	Regulamento de Segurança e Ações (Regulamento Português)
SATCC	<i>SATCC Code of Practice for the Design of Road Bridges and Culverts</i> (Norma sul-africana)
SL	Sobrecarga linear do RSA
SU	Sobrecarga uniforme do RSA
Tandem	Subsistema definido na AASHTO constituído por um veículo de 2 eixos de 2 rodas
Truck	Subsistema definido na AASHTO constituído por um veículo de 3 eixos de 2 rodas
TS	Subsistema definido no EC1 constituído por um veículo de 2 eixos de 2 rodas
UDL	Subsistema definido no EC1 constituído por cargas uniformemente distribuídas
V	Esforço transversal máximo na direção longitudinal
VT	Veículo tipo do RSA
w	Largura do tabuleiro entre lancis ou entre lancil e separador físico
w_E	Largura da via fictícia excedente definida no EC1
w_{fr}	Largura de cada faixa de rodagem
w_v	Largura de cada via fictícia
w_{vt}	Largura de cada via de tráfego
α_{Q1}	Fator de correção a aplicar ao LM1 – TS para a primeira via fictícia
α_{Qi}	Fator de correção a aplicar ao LM1 – TS para a segunda via fictícia e restantes
α_{q1}	Fator de correção a aplicar ao LM1 – UDL para a segunda via fictícia e restantes
α_{qi}	Fator de correção a aplicar ao LM1 – UDL para a segunda via fictícia e restantes

α_{qE}	Fator de correção a aplicar ao LM1 – UDL para a via fictícia excedente
φ	Fator de amplificação dinâmico

Capítulo 1

Introdução

1.1 Atualidade e interesse do tema

Em Portugal vigora, desde 1983, o Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA), que define, com toda a generalidade, as sobrecargas a considerar no dimensionamento e verificação da segurança das pontes, em geral, e das pontes rodoviárias, em particular. No âmbito da normalização europeia, existe já uma versão definitiva da norma que estabelece as ações a considerar nas obras rodoviárias, que é a EN 1991-2, vulgarmente conhecida por Eurocódigo 1 – Parte 2 (EC1), havendo também já uma versão de trabalho do respetivo Anexo Nacional. Assim, a entrada em vigor em Portugal, com carácter obrigatório, desta norma europeia, poderá acontecer a curto prazo, pois na maioria dos países europeus, nomeadamente no centro e norte da Europa, a utilização dos eurocódigos tem vindo a generalizar-se (Figura 1.1).

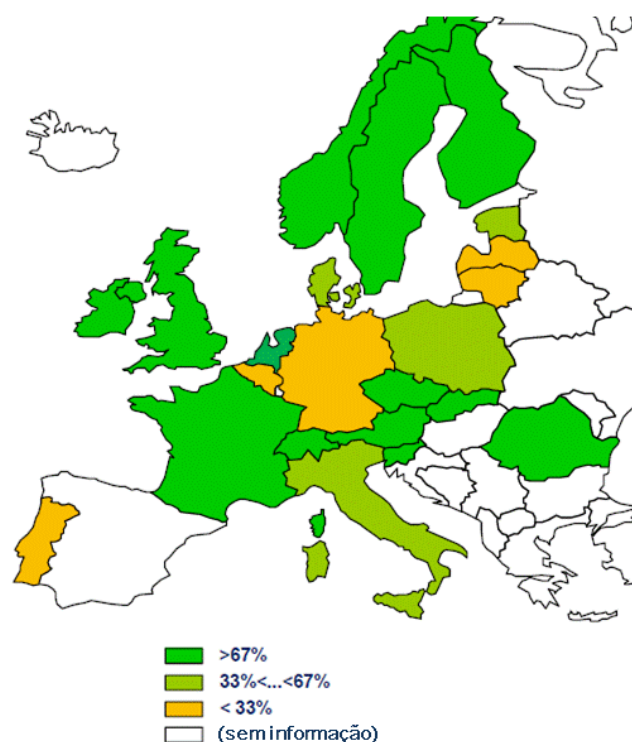


Figura 1.1 – Panorama geral da utilização dos eurocódigos estruturais nos países da Europa, em setembro de 2010 [Pinto, 2010].

No caso das obras rodoviárias, as ações correspondentes às sobrecargas são substancialmente diferentes na RSA e no EC1, pelo que importa realizar estudos de comparação entre as duas normas, para preparar o meio técnico português para essa nova realidade.

A engenharia de pontes portuguesa, depois de uma fase próspera de cerca de quatro décadas de projeto e construção de obras integradas na excelente rede de estradas que atualmente serve o país, está a voltar-se para mercados no estrangeiro, nomeadamente em África e na América Latina, onde se estão a verificar investimentos significativos em infraestruturas de transportes, mas em que se utilizam outros regulamentos de estruturas. Em muitos países do norte e centro de África, de influência francófona, é adotada a regulamentação europeia, mas nos países da esfera anglófona da África central e do sul é considerada a regulamentação da república sul-africana. Em Angola e Moçambique são considerados, com frequência, as normas e os regulamentos portugueses. Na América Latina existe uma grande implantação das normas norte-americanas, mas no Brasil há um conjunto completo de normas dedicadas às obras rodoviárias. Assim, foi decidido considerar, neste estudo comparativo, para além do RSA e do EC1-2, a norma sul-africana (SATCC), a norma norte-americana (AASHTO) e o regulamento brasileiro (ABNT).

As sobrecargas rodoviárias verticais são, entre as ações do tráfego a que as pontes e os viadutos estão sujeitas, as que condicionam o dimensionamento e a verificação da segurança dos tabuleiros, pelo que apenas serão abordados, no presente trabalho, esse tipo de ações. O termo sobrecarga, utilizado naturalmente muitas vezes ao longo do texto, referir-se-á às sobrecargas rodoviárias que têm direção vertical.

1.2 Definição das ações do tráfego rodoviário

O dimensionamento das estradas é condicionado pela intensidade e peso bruto dos veículos pesados que nelas circulam, acontecendo o mesmo nas pontes e viadutos que servem essas estradas.

Devido ao diferenciado desenvolvimento económico dos países e às alterações que se têm verificado na utilização relativa dos diferentes meios de transporte de pessoas e bens, devido a questões energéticas e ambientais, as características do tráfego rodoviário tem sofrido mudanças significativas no último século. Mas entre países e entre regiões de um mesmo país há variações enormes no tipo de tráfego. Nos países menos desenvolvidos e em vias de desenvolvimento tem-se verificado um aumento significativo desse tráfego, com o aumento do número de veículos em circulação, a alteração no espaçamento e número de eixos desses veículos e o aumento da tara e do peso bruto dos camiões. Tem sido esta evolução que tem motivado a construção de novas estradas.

A definição das ações correspondentes ao tráfego rodoviário é feita, em regra, por uma via estatística, tendo em consideração as medições realizadas num número representativo de trechos de estrada desse país ou região. A título de exemplo apresentam-se, na Figura 1.2, os histogramas com a frequência relativa do peso dos camiões, medido numa estrada de velocidade limitada em Auxerre (França) e na autoestrada M4 da República da Irlanda [Croce e Malakatas, 2010].

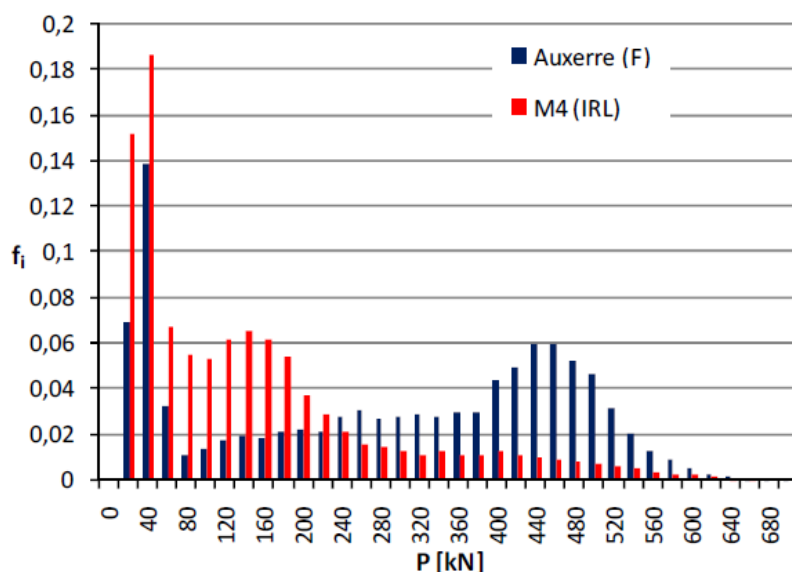


Figura 1.2 – Histogramas com a frequência relativa do peso dos camiões numa estrada de velocidade limitada em Auxerre (França) e na autoestrada M4 da República da Irlanda [Croce e Malakatas, 2010].

A partir das características do próprio tráfego e do tratamento estatístico dos dados associados, as normas definem conjuntos de modelos globais de sobrecargas que pretendem representar as situações envolventes correspondentes a uma determinada probabilidade de não excedência. Esses modelos de sobrecarga devem ajustar-se às seguintes condições gerais [Croce e Malakatas, 2010]:

- serem de simples utilização na análise estrutural;
- reproduzirem corretamente os efeitos das cargas principais;
- serem os mesmos para verificações locais e globais;
- cobrirem todas as situações possíveis, isto é, representarem os cenários mais desfavoráveis do tráfego;
- estarem em correspondência com os níveis definidos de fiabilidade estrutural;
- incluírem os efeitos dinâmicos do tráfego.

Em regra, os modelos de sobrecarga considerados nas normas cumprem os requisitos atrás referidos, sendo constituídos por conjuntos de cargas uniformemente distribuídas e de cargas concentradas, por forma a reproduzirem os efeitos do tráfego rodoviário e não esse tráfego em si.

1.3 Objetivos do trabalho e meios utilizados

A escolha das formas globais e das dimensões das secções transversais dos elementos estruturais, que corresponde à fase de pré-dimensionamento, é de importância significativa nas obras, em geral, e nas pontes e viadutos, em particular. A mencionada experiência de projeto e construção de pontes e viadutos pela engenharia portuguesa, tem como referência, nas obras rodoviárias, as ações definidas no RSA, em geral, e os modelos de sobrecarga constituídos pelo veículo tipo de 600 kN e pelas sobrecargas uniforme (4 kN/m^2) e linear (50 kN/m), em particular. Para os diferentes tipos estruturais de tabuleiros os projetistas têm uma noção clara da influência relativa dos esforços provocados pelas sobrecargas face às outras ações relevantes, nomeadamente o peso próprio, a restante carga permanente e as variações diferenciais de temperatura.

Como referido, é exetável que o EC1 passe a ser utilizado com carácter de obrigatoriedade, a curto prazo, em Portugal. Este facto poderá ter alguma influência na escolha de formas e dimensões dos tabuleiros,

relativamente aqueles que têm sido utilizados na vigência do RSA, devido à definição inequívoca das variações diferenciais de temperatura e, sobretudo, à alteração da forma e da intensidade das sobrecargas rodoviárias. Estas alterações irão provocar um agravamento significativo dos esforços, principalmente nos tabuleiros de médio vão, como adiante se verá, entre os quais se incluem os vigados. A necessidade de utilização de outros regulamentos pela engenharia portuguesa de pontes tem implicado a consideração de formatos e intensidades diferentes para as sobrecargas, originando variações de esforços relativamente aos inerentes ao RSA.

O conjunto de razões atrás descrito levou à decisão de se estudar a relação entre os efeitos, em termos de esforços de flexão e transversos, devidos aos modelos de sobrecargas das normas já mencionadas e do RSA. Foi assim definido como objetivo primordial desta dissertação a obtenção dos esforços máximos longitudinais e transversais produzidos pelos modelos de sobrecargas verticais definidos nas referidas normas, em pontes rodoviárias com tabuleiros de médio vão em laje vigada, com vigas betonadas *in-situ* e com vigas pré-fabricadas. Esta comparação poderá fornecer elementos de trabalho importantes aos projetistas e construtores, identificando-se as normas mais gravosas dentro de uma gama de vãos e tipologia de tabuleiros escolhida como representativa das soluções estruturais mais comuns.

Para cumprir os objetivos do trabalho houve necessidade de efetuar alguns estudos de enquadramento, nomeadamente no que diz respeito a trabalhos do tipo já realizados. Confirmou-se que a preparação e a publicação do EC1 originaram, no caso das obras rodoviárias, a realização de muitos estudos de investigação, sobre as próprias ações e a sua representação por modelos simples, e de comparação com os efeitos induzidos pelas normas vigentes nos países europeus. Relativamente a estes estudos comparativos, no sentido de definir a orientação dos estudos da presente dissertação, fez-se uma pesquisa bibliográfica sobre o tema, tendo-se identificado quatro estudos em Portugal e três estudos no estrangeiro. Dos estudos realizados em Portugal destacam-se os que foram desenvolvidos pelo LNEC, há mais de 30 anos, para apoio à elaboração do RSA, e três dissertações de mestrado recentes, que tiveram como objetivo comum comparar os efeitos produzidos pelos modelos de sobrecargas rodoviárias definidos no RSA e no EC1. No estrangeiro pesquisaram-se dois trabalhos realizados na República da Irlanda, sobre a representação do tráfego rodoviários em modelos de sobrecargas, e um trabalho efetuado na Finlândia, sobre a comparação das sobrecargas rodoviárias da norma russa e do EC1.

Como não poderia deixar de ser, a dissertação apresenta com detalhe os modelos de sobrecargas das cinco normas em confronto.

Atendendo à grande disponibilidade de programas de cálculo automático de elementos finitos para a resolução de estruturas, a análise dos tabuleiros escolhidos foi feita através de modelos de laje vigada, para obtenção dos esforços máximos nas vigas (direção longitudinal) e nos painéis de laje da plataforma (direção transversal). Como na direção transversal os momentos fletores são muitas vezes estimados, em primeira aproximação, através da utilização de métodos mais expeditos, como é o caso das superfícies de influência, fez-se também uma comparação dos resultados obtidos por esta via com os resultados numéricos fornecidos pelo método dos elementos finitos. Esta comparação permite balizar o uso das duas vias e, portanto, em que condições a utilização de superfícies de influência é aceitável.

1.4 Metodologia utilizada nas comparações e casos de estudos escolhidos

O estudo comparativo será feito a partir da análise de cinco casos de estudo, correspondentes a sete tabuleiros cujo dimensionamento se baseou em algumas estruturas correntes projetadas e construídas pela engenharia de pontes portuguesa. Os dois primeiros casos de estudos referem-se a tabuleiros constituídos por vigas principais betonadas *in-situ*. O primeiro caso diz respeito a um tabuleiro de média largura com duas vigas principais e cinco vãos contínuos, tendo-se considerado duas variantes na altura das vigas e no comprimento, uma com 25 m e outra com 40 m. O segundo caso de estudo é similar ao primeiro, mudando unicamente o tabuleiro, passando-se de um tabuleiro de média largura para um

tabuleiro largo. Nos restantes casos de estudos os tabuleiros são constituídos por várias vigas principais, pré-fabricadas. O terceiro caso de estudo refere-se a um tabuleiro estreito composto por três vigas afastadas de 2 m e o quarto caso de estudo tem um tabuleiro largo constituído por sete vigas com o mesmo afastamento. Em ambos os casos de estudo foram considerados três vãos contínuos, em que o central tem 30 m. O último caso de estudo refere-se a um tabuleiro largo com cinco vãos, constituído por quatro vigas pré-fabricadas, tendo os vãos intermédios o mesmo comprimento dos dois casos de estudo anteriores.

Pretendeu-se, com os diferentes casos de estudo escolhidos, avaliar a influência que os principais fatores, a largura do tabuleiro e o seu número de vigas, bem como a extensão dos vãos intermédios, têm nos esforços finais. Em acordo com o pesquisado na bibliografia, espera-se que as sobrecarga constituídas por cargas distribuídas sejam condicionantes nos tabuleiros mais largos e com maiores vãos, ao passo que os conjuntos de forças concentradas sejam mais desfavoráveis em tabuleiros mais estreitos e de menores vãos.

Como já referido, a comparação dos efeitos estruturais das sobrecargas rodoviárias verticais definidas nas cinco normas consideradas foi feita para os esforços máximos na direção longitudinal (vigas) e na direção transversal (laje da plataforma). O cálculo dos esforços foi feito a partir de modelos de elementos finitos constituídos por elementos de barra e elementos de casca.

Recorrendo aos modelos de elementos finitos determinaram-se os momentos fletores máximos e o esforço transversal máximo que ocorrem nas secções de vão e de apoio das vigas das sete estruturas analisadas, considerando um posicionamento das sobrecargas tendo em conta o andamento qualitativo da linha de influência do esforço em apreço.

Na análise transversal obtiveram-se os momentos fletores máximos na secção apoio de laje nas vigas e a meio vão da laje entre vigas. Os resultados numéricos foram posteriormente comparados com os momentos fletores determinados com o auxílio de superfícies de influência.

A comparação dos resultados das análises terá como referência o RSA, por ser a norma em uso entre nós. Desta forma será imediata a perceção entre as diferenças absolutas e percentuais entre os efeitos devidos às sobrecargas das restantes quatro normas e do RSA.

1.5 Organização da dissertação

A dissertação está organizada em seis capítulos, dos quais a presente introdução é o primeiro. No segundo capítulo apresenta-se a pesquisa bibliográfica realizada no âmbito do tema, que incidiu predominantemente em trabalhos realizados em Portugal, mas que também refere alguns estudos feitos na Europa. O terceiro capítulo detalha os modelos de sobrecargas verticais das cinco normas em confronto. No quarto capítulo apresentam-se os casos de estudo escolhidos para realizar as comparações entre os efeitos estruturais das sobrecargas, todos eles constituídos por tabuleiros vigados de betão. O quinto capítulo faz uma síntese dos resultados relevantes obtidos na análise estrutural dos casos de estudo, em termos de comparação de esforços na direção longitudinal e transversal dos tabuleiros; na análise transversal da laje da plataforma complementam-se os resultados numéricos com os obtidos por um método mais simples, correspondente à utilização de superfícies de influência. No último capítulo faz-se uma síntese dos resultados conseguidos com a dissertação.

Em complemento ao corpo do texto da dissertação são incluídos, no final, dois anexos, com a representação dos carregamentos mais desfavoráveis considerados nas análises longitudinal e transversal.

O presente trabalho foi realizado em simultâneo com um outro muito similar, mas considerando os efeitos das sobrecargas rodoviárias em tabuleiros de nervura única e em caixão [Saraiva, 2013]. Como muita da

pesquisa foi realizada em conjunto, os capítulos referentes à pesquisa bibliográfica sobre o tema e à definição das ações do tráfego rodoviário têm um conteúdo semelhante.

Capítulo 2

Pesquisa bibliográfica sobre o tema

2.1 Considerações gerais

No sentido de se poder decidir o melhor caminho a seguir nos desenvolvimentos a realizar no âmbito da presente dissertação, efetuou-se previamente uma pesquisa bibliográfica sobre o tema. Tendo-se definido como referência de comparação o regulamento português, deu-se, como é natural, uma atenção particular aos trabalhos realizados em Portugal. Contudo, teve-se acesso a alguns trabalhos da mesma índole efetuados na Europa, pelo que também serão considerados no presente capítulo.

Em Portugal houve uma mudança significativa dos regulamentos de estruturas há cerca de 30 anos, com a entrada em vigor do RSA e do REBAP. No que respeita à definição das ações de obras rodoviárias, o RSA consagra uma evolução relativamente ao regulamento anterior [RSEP, 1969], refletindo a evolução das características do tráfego rodoviário que acompanhou o desenvolvimento económico verificado a seguir à segunda guerra mundial. No âmbito da normalização europeia, espera-se que a curto prazo se passe a adotar em Portugal o EC1, que define, relativamente à representação do tráfego rodoviário, modelos de sobrecargas melhor ajustados à realidade dos países do centro da Europa, mas que o anexo nacional pretende adaptar ao caso português.

A identificação do desajuste das normas à realidade implica, em regra, a alteração dessas mesmas normas. Essa alteração deve basear-se em estudos detalhados, que mostrem claramente a sua melhor adequação à realidade conhecida, tendo em consideração a evolução do conhecimento nessa área. Foi isso que acontecer previamente a 1983, tendo o LNEC desenvolvido um conjunto de estudos para fundamentar as disposições do RSA. Atualmente, importa antecipar ao meio técnico nacional as alterações mais significativas que resultarão da transição do RSA para o EC1.

No que respeita à transição, há 30 anos, verificadas nas normas portuguesas relativas à definição das sobrecargas correspondentes ao tráfego rodoviário, devem referir-se os estudos realizados no LNEC [Mascarenhas, 1978; Mascarenhas, 1982]. Estes estudos, apesar de serem já antigos e de considerarem regulamentos que já não se encontram em vigor, apresentam conclusões relevantes acerca das principais características dos diferentes modelos de sobrecargas rodoviárias, bem como a influência dessas características nos efeitos estruturais nos tabuleiros.

Nos estudos recentes realizados em Portugal, de comparação dos efeitos induzidos em tabuleiros pelos modelos de sobrecargas rodoviárias, que pretendem balizar a transição entre o RSA e o EC1, devem destacar-se os realizados, no âmbito de teses de mestrado, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) [Freitas, 2008], no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL) [Alves, 2012] e no Instituto Superior Técnico (IST) [Robalo, 2013]. Em todos estes estudos pretendeu-se comparar os esforços induzidos pelos modelos de sobrecargas do RSA e do EC1 em tabuleiros de vão e largura variáveis.

De países europeus conseguiu-se aceder a três estudos, dois realizados na República da Irlanda e outro efetuado na Finlândia.

Nos pontos seguintes apresenta-se uma síntese dos estudos atrás referidos. Pretende-se que esta síntese destacar os resultados relevantes conseguidos nesses estudos e identificar os estudos complementares de análise de tabuleiros vigados com interesse para a presente dissertação.

2.2 Estudos realizados no LNEC para apoio à elaboração do RSA

2.2.1 Objetivos dos estudos

No LNEC foram realizados vários estudos de apoio à elaboração das normas de estruturas que entraram em vigor em 1983, entre as quais o Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA). No que respeita às sobrecargas rodoviárias, teve-se acesso aos estudos da autoria do Eng^o Artur Mascarenhas, cujos resultados relevantes constam de um relatório [Mascarenhas, 1978] e de uma comunicação a um congresso [Mascarenhas, 1982].

Com estes estudos pretendeu-se fazer um apanhado sobre as metodologias de caracterização das ações do tráfego rodoviário em quatro regulamentos europeus (francês, inglês, alemão e espanhol) e realizar uma comparação das ações e dos esforços (momentos fletores e esforços transversos) induzidos nos tabuleiros. Esta análise comparativa foi feita considerando tabuleiros simplesmente apoiados, com vãos compreendidos entre 10 m e 100 m, um número de vias carregadas entre 2 e 5, para 3,50 m de largura de cada via.

Foram considerados os modelos de sobrecargas constituídos por cargas uniformemente distribuídas (lineares ou de faca) e por veículos (conjunto de cargas concentradas).

O relatório é um documento mais extenso e a comunicação faz uma síntese dos resultados mais significativos.

2.2.2 Aspetos relevantes dos estudos

Nos dois documentos apresenta-se a problemática referente à caracterização das ações verticais devidas ao tráfego rodoviário, à determinação dos respetivos efeitos e ao cálculo estrutural, enquadrando a utilização da via estatística, na quantificação das ações e das propriedades estruturais, e da via probabilística na verificação da segurança. Referem-se as vantagens do uso de sistemas regulamentares de cargas para representar as ações do tráfego. Faz-se também o enquadramento da filosofia de verificação da segurança através de estados limites, que foi introduzida na regulamentação portuguesa de estruturas precisamente nessa altura.

São apresentados, com detalhe, os diferentes modelos de sobrecarga definidos nos cinco regulamentos abordados nos estudos (português, francês, inglês, alemão e espanhol) e na proposta para o futuro RSA.

Como referido, o estudo comparativo considerou os efeitos que cada um dos sistemas produzia num tabuleiro simplesmente apoiado com vão variável (10 m, 25 m, 50 m, 75 m e 100 m). O número de vias carregadas variou entre 2 e 5.

Concluiu-se que: i) para vãos menores que 25 m as cargas concentradas inerentes aos veículos especiais produziam efeitos mais desfavoráveis que as sobrecargas constituídas por cargas uniformemente distribuídas e de faca; e ii) para vãos superiores a 25 m e tabuleiros com mais do que 2 vias, as sobrecargas uniformemente distribuídas (lineares e de faca) são mais desfavoráveis que os modelos constituídos por veículos tipo (cargas concentradas).

Verificou-se que as normas alemã e espanhola eram as mais desfavoráveis, seguidas da francesa e da inglesa. Também se constatou que o aumento da largura do tabuleiro (maior número de vias de tráfego)

fazia diminuir as diferenças, chegando a haver casos em que o regulamento português era mais gravoso que as normas francesa e inglesa. Nos momentos fletores obtiveram-se, em situações específicas, aumentos de cerca de 80% relativamente à norma portuguesa, mas os acréscimos verificados nos esforços transversos foram menores.

Os estudos fazem, no final, uma menção relativa à falta de informação de base no que respeita às características do tráfego rodoviário em Portugal, bem como à inadequação das metodologias utilizadas para definição das sobrecargas rodoviárias a considerar no RSA. Por essa razão sugere-se que deveriam ser realizados estudos de caracterização do tráfego em função do tipo de obra e da composição e do espaçamento entre veículos, para o tráfego corrente, e que se estudassem os efeitos devidos à circulação de veículos com cargas especiais.

2.3 Caracterização do tráfego rodoviário e comparação com o RSA e o EC1 (FEUP, 2008)

2.3.1 Âmbito e conteúdo do trabalho

Em 2008, a tese de mestrado em engenharia civil, do ramo de estruturas, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), intitulada *Acção do Tráfego Rodoviário em Pontes de Betão Armado – Análise da situação portuguesa e comparação com os modelos propostos pelo EC1 e pelo RSA*, de João Miguel Mesquita Freitas, orientada pelo Prof. António Abel Ribeiro Henriques, apresentou um estudo de caracterização do tráfego rodoviário português e a comparação entre os efeitos das sobrecargas definidas no RSA e no EC1 em pontes de betão armado.

Genericamente, o estudo apresenta: i) o enquadramento do tráfego rodoviário português no contexto europeu; ii) uma análise estatística do tráfego em dois trechos de estradas portuguesas com grande intensidade de veículos pesados, que são aqueles que condicionam o dimensionamento das estradas e das pontes; e iii) resultados relativos à adequação a Portugal das sobrecargas rodoviárias definidas no EC1, em contraponto à norma portuguesa em vigor, o RSA.

2.3.2 Caracterização do tráfego rodoviário em trechos de estradas portuguesas

No estudo foram analisadas as características do tráfego em trechos de duas estradas portuguesas, nomeadamente na autoestrada A3 (Porto – Valença), entre o km 111,100 e o km 112,000, junto à fronteira com Espanha, e na autoestrada A22 (Via do Infante), entre o km 129,766 e o km 152,000, junto à ponte Internacional sobre o rio Guadiana, também junto à fronteira com Espanha. A caracterização foi efetuada a partir de dados fornecidos pela Estradas de Portugal (EP), referentes ao ano de 2006.

Obteve-se uma distribuição mensal do tráfego semelhante nos dois trechos, com o maior volume em agosto e o menor em janeiro e fevereiro, mas o trecho da autoestrada A3 teve, nesse ano, uma intensidade de passagem de veículos maior que o trecho da A22.

A partir das medições realizadas ao tráfego pesado dos dois trechos de estrada mencionados, foram obtidas as distribuições estatísticas dos pesos desta categoria de veículos, o que permitiu a definição de um modelo de sobrecarga representativo da ação daquele tipo de tráfego nas estradas em apreço.

Apesar destes estudos terem considerado apenas dois trechos de estrada, os resultados deram indicações preciosas relativamente às características do tráfego nacional a adotar na regulamentação. O trabalho incentiva a extensão dos estudos de tráfego a mais trechos de estrada, por forma a que as conclusões possam ser generalizadas.

2.3.3 Comparação dos efeitos estruturais das sobrecargas em tabuleiros de um vão

Com o modelo de sobrecarga obtido para os trechos de estrada portuguesas e com os correspondentes modelos definidos no RSA e no EC1, foram calculados os esforços em tabuleiros de um só vão, simplesmente apoiados, com extensão variável entre 3 m e 60 m, mas com largura constante de 8,00 m.

Concluiu-se que os esforços máximos (momento fletor no meio vão e esforço transversal junto aos apoios), são sempre maiores para as sobrecargas do EC1 relativamente às do RSA, atingindo valores do dobro para vãos próximos de 60 m. Verificou-se ainda que para vãos até cerca de 45 m os esforços induzidos pelo modelo de sobrecarga ajustado aos dois troços nacionais de estrada são sempre maiores que os devidos às sobrecargas do RSA. Também se concluiu que os efeitos das sobrecargas do EC1 são mais próximos dos causados pelo modelo representativo do tráfego nacional, quando comparados com os devidos ao RSA, pelo que se recomenda a adoção do EC1 em detrimento do RSA, por melhor representar a realidade do tráfego português.

O estudo recomenda a realização de mais análises, envolvendo outros cenários e exemplos, fazendo variar a largura dos tabuleiros e as suas condições de apoio, para se dispor de informação mais alargada em termos de resultados e, assim, poderem ser tiradas conclusões mais abrangentes.

2.4 Estudo comparativo das sobrecargas rodoviárias de diferentes normas (ISEL, 2012)

2.4.1 Âmbito e conteúdo do trabalho

A tese de mestrado em engenharia civil, especialização de estruturas, do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), de dezembro de 2012, intitulada *Modelação de Sobrecargas Rodoviárias - Estudo comparativo entre diferentes normas*, de Manuel Pedro da Conceição Alves, orientada pelo Prof. Luciano Jacinto, apresentou um estudo sobre os efeitos estruturais das sobrecargas rodoviárias em pontes de pequeno e médio vão, considerando a definição dessas sobrecargas em cinco regulamentos.

No trabalho são apresentados: i) os aspetos relevantes das ações do tráfego rodoviário e a sua representação em modelos de sobrecarga; ii) os modelos de sobrecarga das normas portuguesa, europeia (EC1), brasileira, norte-americana e canadiana; iii) os efeitos dessas sobrecargas em tabuleiros simplesmente apoiados, de vão variável entre 20 m e 50 m; e iv) o dimensionamento estrutural de um tabuleiro de nervura única, considerando os modelos de sobrecargas rodoviárias do RSA e do EC1, com o objetivo de identificar a diferença no pré-esforço longitudinal necessário à verificação da segurança.

Como referido, para além do RSA e do EC1, foram considerados neste estudo o regulamento canadiano (CAN/CSA-S6-00 –*Canadian Highway Bridge Design Code*), a norma norte-americana (AASHTO - LRFD *Bridge Design Specifications*) e a norma brasileira (ABNT NBR 7188).

2.4.2 Enquadramento e definição nas normas das sobrecargas rodoviárias

O estudo faz uma síntese dos principais fatores a ter em consideração na caracterização do tráfego rodoviário e na definição dos modelos de sobrecarga das normas, referindo-se, em função do tipo de itinerário rodoviário, ao tipo de tráfego, intensidade, composição e velocidade, bem como à variação do peso bruto e do número, peso e espaçamento dos eixos dos veículos.

Apresenta o tratamento das referidas características do tráfego rodoviário através do sistema de medição denominado por *Weigh-in-Motion* (WIM).

São apresentados os modelos de sobrecarga das cinco normas referidas, nomeadamente o peso dos eixos dos veículos tipo e as sobrecargas uniformemente distribuídas. Discute-se a problemática associada à não representação dos veículos reais pelos modelos de sobrecarga definidos nas normas, as quais pretendem simular, essencialmente, os efeitos devidos ao tráfego rodoviário.

2.4.3 Comparação dos efeitos das sobrecargas em tabuleiros de um vão

O trabalho apresenta um estudo comparativo dos efeitos dos modelos de sobrecarga definidos nas cinco normas referidas, usando como casos de estudo tabuleiros simplesmente apoiados de vão variável entre 20 m e 50 m, com largura variável, correspondente à consideração de 2 a 4 vias de tráfego, com 3,00 m de largura cada. Foram identificados os modelos de sobrecarga condicionantes e salientada a influência do

número de vias e da extensão do vão nos valores dos esforços máximos (momento positivo no meio vão e esforço transversal junto aos apoios).

Concluiu-se que as sobrecargas do EC1 conduziram aos maiores esforços na maioria das situações estudadas. Verificou-se, no entanto, que para tabuleiros com 4 vias de tráfego e vãos maiores que 40 m, esse acréscimo vai-se esbatendo nos momentos fletores, relativamente às normas portuguesa e brasileira. Os modelos de sobrecarga das normas norte-americana e canadiana induziram esforços sempre menores que os produzidos pelo RSA.

Com o aumento dos vãos verificou-se que os modelos que consideram sobrecargas uniformemente distribuídas são os mais desfavoráveis. Para vãos com mais de 50 m e tabuleiros com 4 vias (isto é, tabuleiros mais largos e de maior vão, dentro da gama de vãos considerada), a norma brasileira, que tem o maior valor da sobrecarga distribuída, é a que induz os maiores esforços.

Relativamente ao RSA, os esforços calculados considerando as sobrecargas do EC1 são consideravelmente maiores, atingindo acréscimos de 75% nos momentos fletores e de 79% nos esforços transversos.

O estudo recomendou a realização de estudos deste tipo: i) em países onde haja ainda um grande potencial de construção de novas pontes; e ii) direcionados para a avaliação da segurança de pontes já existentes, nomeadamente em Portugal.

No dimensionamento e verificação da segurança de um tabuleiro apoiado de nervura única, considerando as sobrecargas do RSA e do EC1, concluiu-se que, apesar dos esforços devidos às sobrecargas serem substancialmente maiores no caso do EC1, o acréscimo nos valores de cálculo dos esforços atuantes esbate-se significativamente.

2.5 Comparação dos efeitos das sobrecargas rodoviárias do RSA e do EC1 em tabuleiros com duas vigas (IST, 2013)

2.5.1 Âmbito e conteúdo do trabalho

Em 2013, a tese de mestrado em engenharia civil, especialização em estruturas, do Instituto Superior Técnico (IST), intitulada *Structural Analysis of Road Bridge Decks: Comparison between the Portuguese code (RSA) and the Eurocode Load Model 1: Evaluation of the global and local effects*, de João Nuno Taborda Brás Robalo, com orientação do Prof. Francisco Virtuoso e do Prof. Ricardo Vieira, apresentou, para tabuleiros constituídos por duas vigas principais, duas partes complementares: i) o desenvolvimento de métodos semi-analíticos para a análise dos esforços na direção transversal; e ii) a comparação dos esforços devidos às sobrecargas rodoviárias do RSA e do EC1.

2.5.2 Desenvolvimento de métodos semi-analíticos para a análise transversal

Na primeira parte do trabalho começa-se por apresentar os métodos disponíveis para a determinação dos momentos fletores na consola e na laje intermédia de tabuleiros dotados de duas vigas, para a ação de cargas concentradas. Os métodos considerados têm graus progressivos de aproximação, começando pelo caso mais simples, em que se considera uma espessura uniforme da laje e a posição da carga é independente da secção longitudinal do tabuleiro, até ao caso em que é considerada a variação de espessura e a posição das cargas.

Para o painel em consola é desenvolvido um método semi-analítico para a determinação dos momentos fletores, utilizando funções trigonométricas. O método tem em consideração as propriedades relevantes da consola, que são quantificadas através de quatro coeficientes, obtidos através de análises pelo método dos elementos finitos para uma gama alargada de situações, permitindo tabelá-los. A validação do método foi feita através da boa concordância obtida nos momentos fletores transversais na consola, calculados pelo método em apreço e através de um programa de elementos finitos.

O método foi de seguida generalizado para a determinação dos momentos fletores no painel de laje entre vigas, tendo-se efetuado, através de uma abordagem similar, ao ajustamento e calibração dos coeficientes, insertos em tabelas, a considerar nas expressões analíticas. Tal como tinha acontecido no caso da consola, o método proporcionou resultados de boa qualidade quando comparados com os obtidos através de um programa de elementos finitos.

2.5.3 Comparação dos efeitos das sobrecargas do RSA e do EC1

A segunda parte do trabalho foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa fez-se a comparação, para tabuleiros com duas vigas principais, dos esforços transversais e longitudinais devidos às sobrecargas do RSA e o do EC1. Na segunda etapa, para testar os resultados obtidos em estruturas reais, foi feita uma análise comparativa dos esforços devidos às sobrecargas daquelas duas normas num tabuleiro constituído por duas vigas e num tabuleiro formado por duas nervuras.

Na referida primeira etapa foi analisado um número considerável de tabuleiros, considerando como variáveis o comprimento dos vãos (20 m a 50 m, com um incremento de 5 m), o número de vãos (1, 2, 3 e 5 vãos) e a largura do tabuleiro (8 m a 20 m, com um incremento de 4 m). Na análise transversal foram comparados, para a secção de meio vão dos tramos, os momentos fletores na consola e no painel intermédio de laje. Na análise longitudinal, para além da determinação dos esforços individualizados, foi calculado o valor percentual dos esforços devidos às sobrecargas face aos esforços totais dos tabuleiros, tendo-se concluído que em todas as situações estudadas o EC1 era sempre mais desfavorável que o RSA, sendo que os valores dos esforços (momentos fletores e esforços transversos) superiores entre 35% e 60%.

Na análise comparativa realizada com os dois tabuleiros reais verificou-se, uma vez mais, que os esforços devidos às sobrecargas do EC1 eram sempre superiores aos provocados pelas sobrecargas do RSA.

2.5.4 Resultados relevantes do estudo

Enfatiza-se a utilidade de aplicação do novo método semi-analítico para a determinação dos esforços na direção transversal, devido à simplicidade da sua aplicação e à boa aproximação dos resultados para cargas de faca ou concentradas.

Conclui-se que as sobrecargas do EC1 são, dentro da gama estudada de vãos e de larguras de tabuleiros de duas vigas principais, sempre mais desfavoráveis que as do RSA.

Sugere-se, finalmente, que os estudos comparativos realizados sejam estendidos a mais normas.

2.6 Comparação das sobrecargas rodoviárias na Holanda e na Eslovénia (O'Brien et al, 2006)

O trabalho intitulado *Bridge assessment loading: a comparison of West and Central/East Europe* compara o tráfego real junto a pontes em lugares específicos de países membros da união europeia, representando diferentes estados de desenvolvimento da economia, designadamente a Holanda, a Eslovénia, a França e Polónia. Os casos da Holanda e da França representam economias fortemente industrializadas, sendo a Eslovénia e a Polónia estados que aderiram mais tarde à união europeia, estando a sua economia em desenvolvimento.

Escolhidos os casos da Holanda e da Eslovénia, foi realizado um estudo estatístico do tráfego em três locais distintos em cada país, tendo em conta o número de eixos dos veículos e o peso destes. Os resultados dos estudos foram comparados entre si e também com os valores teóricos do EC1, tendo-se concluído que existe uma grande diferença entre os valores do fluxo e do peso de veículos entre os locais estudados nestes dois países.

Concluiu-se que as sobrecargas do EC1 se adaptam melhor ao caso holandês e que o modelo obtido do estudo estatístico ajusta-se melhor às obras de duas vias da Eslovénia.

Refere-se ainda que em caso de necessidade de reforço ou de reabilitação das obras, deve ser realizado para resistir aos esforços máximos provocados pelo EC1. Contudo, se a obra não apresentar uma intensidade de tráfego significativa, deve ser ponderada a possibilidade de condicionar o tráfego em alternativa ao seu reforço.

2.7 Avaliação do impacto do aumento das sobrecargas nas obras existentes (O'Brien et al, 2008)

No trabalho intitulado *Implications of Future Heavier Trucks for Europe's Bridge*, considera-se o aumento do volume e do peso bruto do tráfego rodoviário na Europa a médio prazo, para avaliação da reserva de capacidade resistente das estruturas existentes.

O estudo estatístico apresentado conclui que se for permitido o aumento do peso e do número de eixos dos veículos, as sobrecargas associadas não irão influenciar significativamente os valores dos esforços máximos. Realça-se ainda que, na hipótese de alguns países aumentarem o comprimento e o peso dos veículos especiais, não irá trazer alterações significativas nos valores dos esforços nos tabuleiros de curto e médio vão.

2.8 Comparação das sobrecargas da norma russa e do EC1 (Lukianenko, 2008)

No trabalho intitulado *Comparison of Russian norms (SNIps) and European norms (Eurocodes) for road and railway bridges*, efetuado na Finlândia, estudaram-se as diferenças entre as normas europeia e russa, devido à proximidade geográfica, pois na Finlândia vigoram os eurocódigos e na Rússia adota-se a norma SNIps.

O estudo compara os modelos de sobrecarga das referidas normas e aplica-os na verificação da segurança de uma viga simplesmente apoiada. No exemplo escolhido verificou-se que os efeitos da norma russa são muito idênticos aos do EC1, tendo-se obtido diferenças de apenas 0,06% para o estado limite de utilização e de 2,65% para os estados limites últimos.

Os resultados do estudo são muito limitados, sendo necessário um maior número de casos de estudo para se poderem tirar conclusões mais abrangentes.

2.9 Aspetos relevantes dos estudos apresentados

Os estudos realizados no LNEC, de apoio à elaboração do RSA, apesar de não terem atualidade, pois as normas então consideradas já não se encontram em vigor, referem aspetos relevantes a considerar na definição dos modelos de sobrecargas rodoviárias, que foram contemplados no EC1. Os estudos concluem que os sistemas de cargas concentradas são condicionantes nos tabuleiros mais estreitos e de menores vãos, ao passo que os sistemas de cargas distribuídas são mais desfavoráveis em tabuleiros largos e de maior vão.

As três dissertações de mestrado apreciadas têm, como seria de esperar, algumas abordagens comuns e as conclusões são similares em muitos aspetos. Tal como os trabalhos realizados no LNEC há mais de 30 anos, as dissertações descreveram os modelos de sobrecargas de obras rodoviárias das normas em comparação e confrontam os seus efeitos estruturais, nomeadamente esforços de flexão e transversos, em tabuleiros com vão variável, mas com tipologias simples, designadamente de nervura única ou com duas vigas principais.

Na primeira dissertação, elaborada na FEUP em 2008, efetuou-se o estudo estatístico do tráfego português em dois trechos de estrada com circulação intensa de veículos pesados e obtiveram-se modelos de sobrecarga representativos dos troços analisados. Fez-se também a comparação dos esforços produzidos pelos modelos pesquisados e pelos inerentes ao RSA e ao EC1, para tabuleiros simplesmente apoiados de

largura constante e vão variável entre 3 m e 60 m, tendo-se concluído que o EC1 é sempre mais desfavorável. Os resultados obtidos deste estudo são muito interessantes, designadamente no que respeita ao tratamento das características do tráfego nacional. Contudo, a gama de vãos, as condições de apoio e a largura e a tipologia de tabuleiros analisados apenas representam um conjunto reduzido das estruturas atuais, pelo que não se podem generalizar as conclusões do estudo.

A dissertação elaborada no ISEL em 2012 compila informação importante relativa à caracterização do tráfego rodoviário e à sua representação em diferentes normas, nomeadamente nas portuguesa, europeia, brasileira, norte-americana e canadiana. Do estudo comparativo efetuado entre o RSA e o EC1 para tabuleiros de largura variável, simplesmente apoiados com vãos de 20 m a 50 m, conclui-se, tal como aconteceu na dissertação da FEUP, que esta última norma é sempre mais desfavorável.

O estudo realizado em 2013 no IST foi mais abrangente pois considerou as análises transversal e longitudinal de tabuleiros constituídos por duas vigas principais. Nos estudos fez-se variar a largura e a extensão dos vãos do tabuleiro e, na análise longitudinal, também o número de vãos. Tendo-se considerado tabuleiros com vários vãos, a comparação dos esforços devidos às sobrecargas do RSA e do EC1 também abarcou os momentos fletores negativos. Verificou-se, uma vez mais, que para vãos até 50 m, que o EC1 é mais gravoso que o RSA.

Os três estudos confirmaram que, para vãos até 60 m e tabuleiros de nervura única ou com duas vigas principais, simplesmente apoiados ou com vãos contínuos, o EC1 é sempre mais desfavorável que o RSA, no que respeita a esforços de flexão e transversos.

Os estudos realizados na República da Irlanda abordaram temas relacionados com o tratamento estatísticos do tráfego e a sua representação em modelos de sobrecargas. O estudo finlandês compara, num número limitado de casos, as sobrecargas da norma russa e do EC1.

Os estudos portugueses atrás referidos consideraram, na vertente de comparação de efeitos estruturais, as sobrecargas rodoviárias definidas do RSA e no EC1. Como mencionado no primeiro capítulo, a engenharia portuguesa de pontes tem vindo a expandir-se para o estrangeiro, designadamente para países de África e da América Central e do Sul. Parece então interessante, para apoiar as entidades portuguesas envolvidas no projeto e construção de pontes nos países das referidas áreas geográficas, que se façam estudos comparativos dos efeitos das sobrecargas considerando as normas em uso nessas regiões, designadamente a sul-africana, a norte-americana e a brasileira.

No que diz respeito à tipologia dos tabuleiros, afigura-se que existem situações relevantes que os trabalhos atrás descritos não abordaram, nomeadamente a consideração de: i) vãos de média dimensão (20 m a 30 m), com tabuleiros estreitos ou de média largura, de nervura única, para avaliação dos efeitos da torção; ii) vãos de extensão maior que 60 m em tabuleiros contínuos com secção em caixão, para análise dos esforços de flexão, transversos e de torção; e iii) tabuleiros vigados, de médio vão, com várias vigas principais, muitas vezes construídos com recurso a vigas pré-fabricadas.

Os aspetos referidos em i) e ii) do parágrafo anterior foram tratados num trabalho desenvolvido em paralelo [Saraiva, 2013], considerando as sobrecargas definidas nas normas portuguesa, europeia, sul-africana, norte-americana e brasileira. No presente trabalho pretende-se abordar o aspeto referido em iii) do parágrafo anterior, considerando aquelas cinco normas, para que se possam obter ordens de grandeza relativas dos esforços devidos às sobrecargas dessas normas e se possam tirar conclusões mais abrangentes para os tabuleiros vigados de médio vão, constituídos por duas ou mais vigas principais

Capítulo 3

Ações rodoviárias definidas em 5 normas

3.1 Normas e regulamentos considerados no trabalho

Em regra existem normas, em cada país, que definem as ações do tráfego rodoviário que devem ser consideradas no projeto das estruturas. Estas normas incluem um conjunto de modelos de sobrecarga com o objetivo de simular os efeitos do tráfego real. Os modelos de sobrecarga, embora não representem situações efetivas de tráfego, pretendem simular os efeitos máximos que o tráfego rodoviário provoca nas estruturas ao longo da sua vida [Mascarenhas, 1978].

As normas definem modelos de sobrecargas verticais que são compostos por três diferentes tipos de cargas, constituídos por sistemas cargas concentradas, por sistemas de cargas distribuídas (lineares ou em superfície) e por sistemas mistos de cargas concentradas e de cargas distribuídas. As diferentes cargas, definidas pela intensidade e forma linear e de superfície, são consideradas nas normas e regulamentos através de arranjos entre elas e de condições gerais e específicas de aplicação nos tabuleiros.

As sobrecargas verticais são em geral definidas de forma a que os seus efeitos sejam obtidos através de uma análise estática das estruturas. Em algumas normas e regulamentos os efeitos dinâmicos do tráfego estão já incluídos nos valores das sobrecargas, independentemente do tipo estrutural, mas em outros esses efeitos são representados por coeficientes dinâmicos, que dependem do tipo de modelo de sobrecarga e do tipo de estrutura.

Como referido, a engenharia de pontes portuguesa está envolvida, em vários países do mundo, no projeto e construção de pontes. Esses países localizam-se na Europa, no Médio e no Extremo Oriente, na América do Sul e Central e em África. Em Portugal está-se, como também já foi referido, na fase de transição para os eurocódigos, e nas outras regiões mencionadas usam-se, para além de normas locais, as normas europeias e norte-americanas. Dessas normas locais deve referir-se a brasileira e a sul-africana, pela importância que têm na América do Sul e na África Austral. Assim, as cinco normas e regulamentos em causa são as seguintes:

- RSA: Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (regulamento português) [RSA, 1983];
- EN 1991-2-2003: Ações em Estruturas - Ações de Tráfego em Pontes (norma europeia) [EC1, 2003];
- AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications* (norma norte-americana) [AASHTO, 2007];
- SATCC *Code of Practice for the Design of Road Bridges and Culverts* (norma sul-africana) [SATCC, 2001];
- ABNT NBR 7188 (norma brasileira) [NBR, 1982].

Nos pontos seguintes são apresentados os modelos de sobrecargas rodoviárias verticais definidas nestas cinco normas selecionadas.

3.2 Regulamento português (RSA)

3.2.1 Generalidades

Desde 1983 vigora, em Portugal, o Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA). Este regulamento substituiu o Regulamento de Solicitações em Edifícios e Pontes (RSEP) e o Regulamento de Pontes Metálicas (RPM) [Pipa, 2009].

As sobrecargas rodoviárias são estabelecidas no Artigo 41.º do capítulo IX do RSA, dividindo-se em dois modelos, o veículo tipo e as sobrecargas uniforme e linear. Os dois modelos de sobrecarga devem ser considerados na determinação dos efeitos mais desfavoráveis nas direções transversal e longitudinal, sendo o mais gravoso o adotado no dimensionamento e verificação da segurança das estruturas.

O RSA classifica as pontes consoante o tipo de tráfego, podendo ser da Classe I, correspondendo a tráfego pesado, ou da Classe II, quando o tráfego é mais ligeiro. Neste trabalho vai considerar-se que as obras são de Classe I, à semelhança do que acontece com a classificação da generalidade das pontes portuguesas.

3.2.2 Veículo tipo

O primeiro modelo de sobrecarga é constituído por um veículo de 3 eixos de 2 rodas, com eixo longitudinal paralelo ao eixo do tabuleiro. O veículo pode situar-se em qualquer posição na faixa de rodagem e bermas e, no caso de existir uma barreira física entre faixas, devem ser considerados veículos tipo em cada faixa de rodagem. Na direção transversal o veículo deve posicionar-se no local mais desfavorável, podendo no limite as rodas situarem-se encostadas ao lancil.

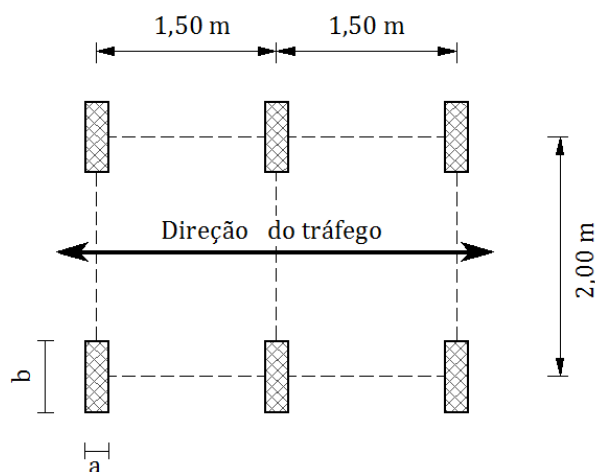


Figura 3.1 – Configuração em planta do veículo tipo do RSA

O valor característico da carga Q e as dimensões do retângulo ($a \times b$) de cada roda do veículo são apresentados na tabela 3.1 e figura 3.1, em função da classe da obra.

Tabela 3.1 – Carga e dimensões das rodas do veículo tipo do RSA

Classe da obra	Q [kN]	a [m]	b [m]
Classe I	100,0	0,20	0,60
Classe II	50,0	0,20	0,40

3.2.3 Sobrecargas uniforme e linear

O modelo constituído pelas sobrecargas uniforme e linear é composto por uma carga uniformemente distribuída em superfície, q_1 , e por uma única carga transversal com distribuição linear e uniforme, q_2 . Estas duas cargas devem ser consideradas em simultâneo nas faixas de rodagem e bermas do tabuleiro. Os valores característicos constam na tabela 3.2, consoante a classe da obra.

Tabela 3.2 – Valores das sobrecargas uniforme e linear do RSA

Classe da obra	q_1 [kN/m ²]	q_2 [kN/m]
Classe I	4,0	50,0
Classe II	3,0	30,0

Na figura 3.2 está representado um exemplo genérico das sobrecargas q_1 e q_2 para uma largura w entre lanciais ou perfis de segurança, para uma obra da classe I.

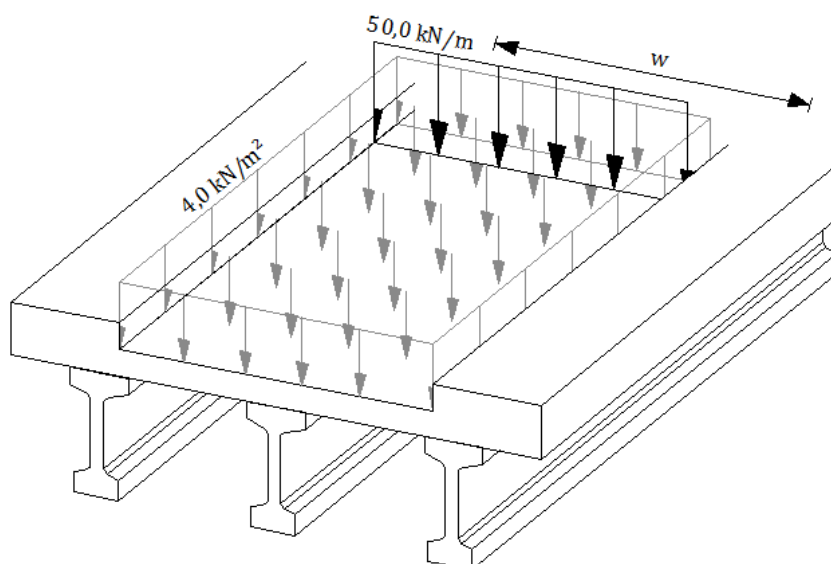


Figura 3.2 – Sobrecargas uniforme e linear do RSA num tabuleiro da classe I

3.3 Norma europeia (EN 1991 - 2 - 2003)

3.3.1 Generalidades

Há cerca de vinte e cinco anos o Comité Europeu de Normalização (CEN) deu início à elaboração de normas estruturais europeias, denominadas por Eurocódigos, com o objetivo de uniformizar a regulamentação nos países europeus e verificar a conformidade das obras existentes relativamente aos principais requisitos estruturais de segurança. Como referido, em Portugal esta regulamentação europeia ainda não se encontra em vigor, apesar de já terem sido publicados diversos Anexos Nacionais de aplicação [Pipa, 2009].

No que respeita às ações, a sua definição consta do Eurocódigo 1 (EC1), sendo a Parte 2 relativa às ações do tráfego rodoviário em pontes. As ações verticais correspondentes às sobrecargas rodoviárias constam da secção 4.3.

O EC1 prevê duas classes de tráfego, correspondendo a Classe I às pontes cujo tráfego é maioritariamente constituído por veículos pesados ou de carácter industrial, aplicando-se a Classe II ao tráfego corrente das estradas nacionais e autoestradas. No presente trabalho considerar-se-ão as obras em análise como incluídas na Classe II.

3.3.2 Definição do número de vias

O EC1 prevê a divisão da largura total w das faixas de rodagem e bermas do tabuleiro num número de vias fictícias, conforme se estabelece na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Número e largura das vias do EC1

Largura entre lancis - w [m]	Número de vias - n	Largura das vias - w_v [m]	Largura excedente- w_E [m]
$w < 5,40$	$n = 1$	3,00	$w - 3,00$
$5,40 \leq w < 6,00$	$n = 2$	$\frac{w}{2}$	0
$6,00 \leq w$	$n = \text{int}\left(\frac{w}{3}\right)$	3,00	$w - 3n$

As vias fictícias servem apenas para efeito de cálculo, não tendo nenhuma relação direta com as vias de tráfego marcadas no pavimento. A largura w pode genericamente ser definida pela distância entre lancis, ou entre o lancil e o separador físico.

A figura 3.3 apresenta um exemplo da divisão da largura w em vias fictícias.

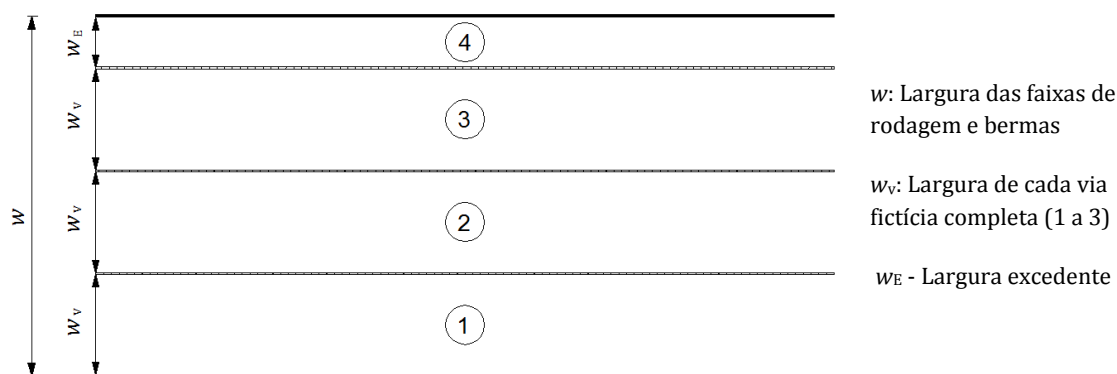


Figura 3.3 – Exemplo genérico da divisão de um tabuleiro em vias fictícias, segundo o EC1

3.3.3 Modelos de sobrecargas

Na secção 4.3 da Parte 2 do EC1 são definidos quatro modelos de sobrecargas para representar as ações rodoviárias verticais, devendo ser considerado, para efeitos de dimensionamento, o modelo que induzir os efeitos mais desfavoráveis no elemento em análise.

3.3.3.1 Modelo de carga 1 (*Load Model 1*– LM1)

O primeiro modelo definido pelo EC1, designado por LM1, pretende simular o tráfego corrente, constituído por veículos ligeiros e camiões comuns. Este modelo está direcionado para a realização de análises globais e locais dos esforços.

O LM1 é composto por uma carga uniformemente distribuída (UDL) e por um veículo de 2 eixos de 2 rodas (TS), em que cada roda tem uma área quadrada de contacto com o pavimento de 0,16 m². Devem ser considerados cada um destes submodelos por via, tomando os valores indicados na tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Valores característicos dos subsistemas de sobrecargas TS e UDL do EC1

Número da via <i>i</i>	Subsistema UDL	Subsistema TS
	q_{ik} [kN/m ²]	Peso de cada eixo Q_{ik} [kN]
Via 1	9,0	300,0
Via 2	2,5	200,0
Via 3	2,5	100,0
Outras vias	2,5	0
Via excedente	2,5	0

O EC1 define fatores de correção (α_Q e α_q) que permitem ajustar a intensidade das cargas de acordo com o tráfego rodoviário do local da obra. Estes fatores são especificados para cada via do tabuleiro de acordo com o definido por cada país no seu Anexo Nacional. Em Portugal o Anexo Nacional ainda não foi homologado, mas já existe uma proposta, em avaliação técnica, que propõe a utilização dos fatores indicados na tabela 3.5 [NP-EC1, 2012].

Tabela 3.5 – Fatores de correção α_Q e α_q para as diferentes vias fictícias (proposta do Anexo Nacional do EC1)

Classificação da obra	α_{Q1}	α_{Qi} ($i \geq 2$)	α_{q1}	α_{qi} ($i \geq 2$)	α_{qE}
Classe I	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Classe II	0,9	0,8	0,7	1,0	1,0

Na figura 3.4 apresenta-se o modelo de sobrecarga LM1 para um tabuleiro genérico composto por 3 vias e a largura remanescente. A figura pretende ilustrar os sub-sistemas do LM1, a sobrecarga uniforme (UDL) e o veículo (TS), e como estes se distribuem em planta.

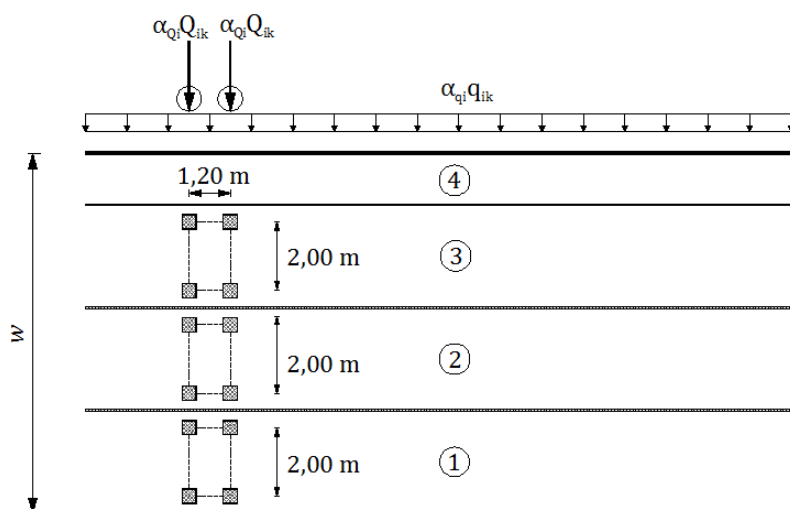


Figura 3.4 – Exemplo genérico do carregamento LM1 nas vias fictícias de um tabuleiro

Na direção transversal os veículos devem estar posicionados nos limites de cada via, de forma a produzir o efeito mais desfavorável. Em vias adjacentes, os veículos têm de estar afastados, no mínimo, 0,50 m (Figura 3.5).

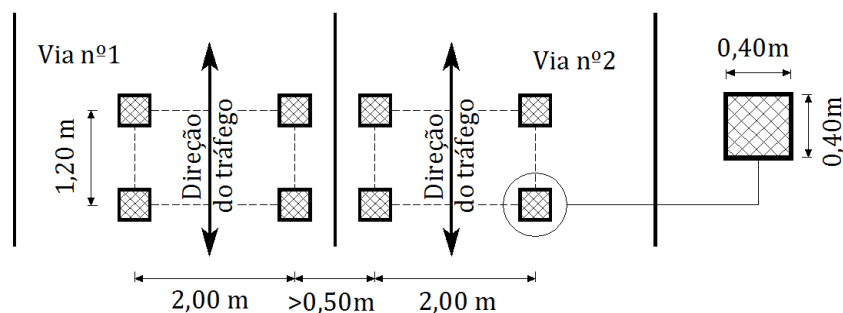


Figura 3.5 – Disposição em planta dos veículos do LM1 para verificações locais

3.3.3.2 Modelo de carga 2 (*Load Model 2* - LM2)

O segundo modelo de sobrecargas, designado por LM2, consiste num veículo composto por um eixo de duas rodas. Este modelo pode aplicar-se em qualquer zona da faixa de rodagem e bermas, com o eixo perpendicular ao eixo do tabuleiro (Figura 3.6). Este modelo pretende simular os efeitos dinâmicos locais em tabuleiros de largura entre 3,00 m e 7,00 m.

A sobrecarga total é de 400 kN, podendo ser afetada de um fator de correção β_Q , que toma o mesmo valor de α_{Q1} .

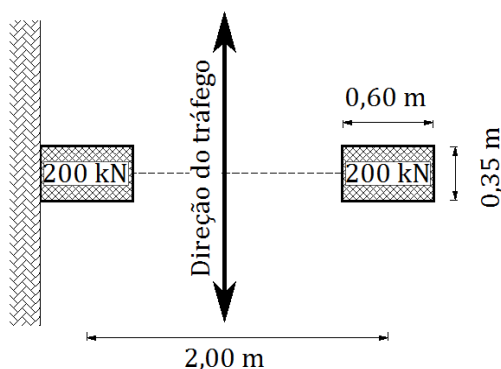


Figura 3.6 – Modelo de carga 2 (*Load Model 2* - LM2)

Na proximidade de juntas de dilatação deve considerar-se um fator de amplificação dinâmica φ para o LM2, dado pela expressão seguinte:

$$\varphi = 1,30 \left(1 - \frac{D}{26} \right) \geq 1$$

Para os casos de estudo abordados, admite-se que não existem juntas de dilatação. Assim, considerou-se um valor unitário para o fator de amplificação dinâmica.

3.3.3.3 Modelo de carga 3 (*Load Model 3* – LM3)

O terceiro modelo de sobrecarga, designado por LM3, define diversos veículos especiais que circulam em condições de tráfego controladas. O anexo A do EC1-2 define 17 veículos especiais. Os veículos têm pesos totais compreendidos entre 600 kN e 3600 kN, distribuídos por 4 a 15 eixos (Figuras 3.7 a 3.23).

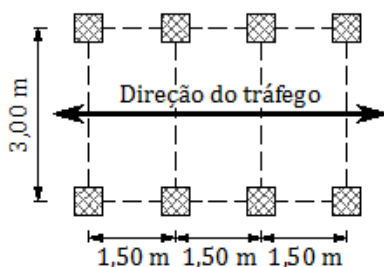


Figura 3.7 – Veículo especial composto por 4 eixos com peso de 150 kN/eixo

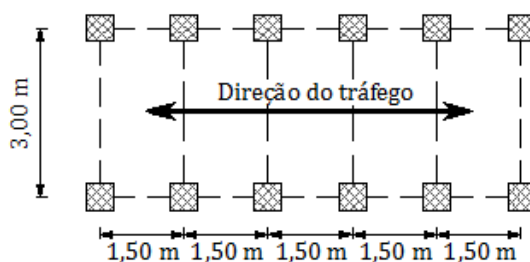


Figura 3.8 – Veículo especial composto por 6 eixos com peso de 150 kN/eixo

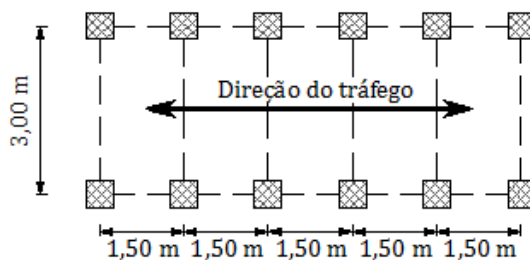


Figura 3.9 – Veículo especial composto por 6 eixos com peso de 200 kN/eixo

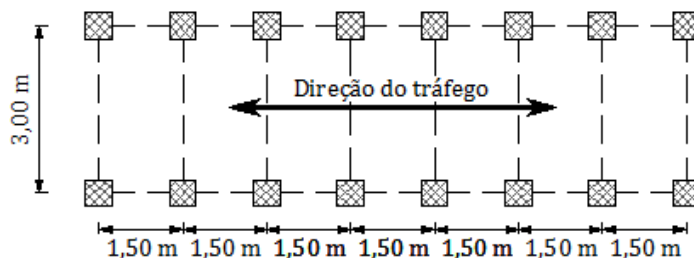


Figura 3.10 – Veículo especial composto por 8 eixos com peso de 150 kN/eixo

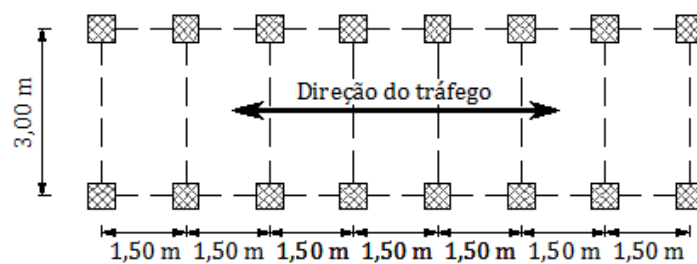


Figura 3.11 – Veículo especial composto por 7 eixos com peso de 200 kN/eixo, mais um eixo de peso igual a 100 kN

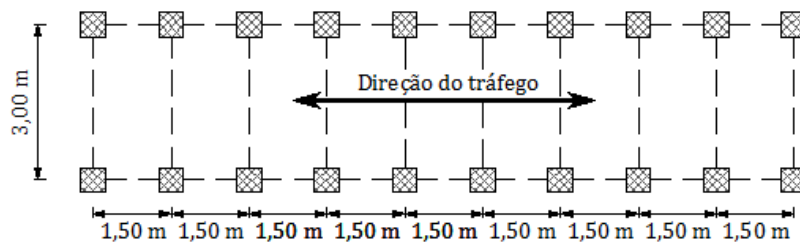


Figura 3.12 – Veículo especial composto por 10 eixos com peso de 150 kN/eixo

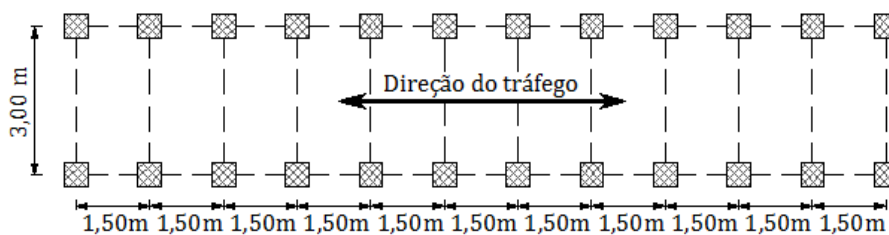


Figura 3.13 – Veículo especial composto por 12 eixos com peso de 150 kN/eixo

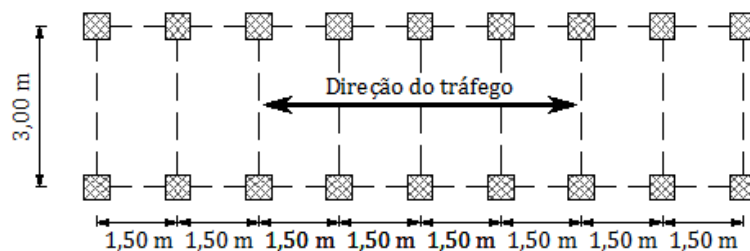


Figura 3.14 – Veículo especial composto por 9 eixos com peso de 200 kN/eixo

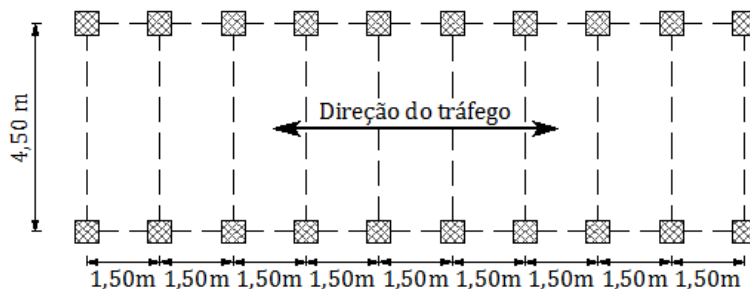


Figura 3.15 – Veículo especial composto por 10 eixos com peso de 240 kN/eixo

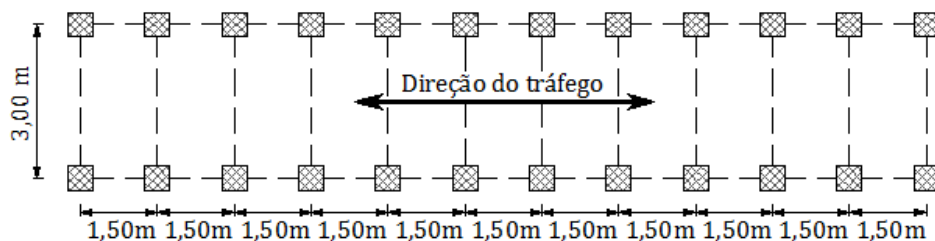


Figura 3.16 – Veículo especial composto por 12 eixos com peso de 200 kN/eixo

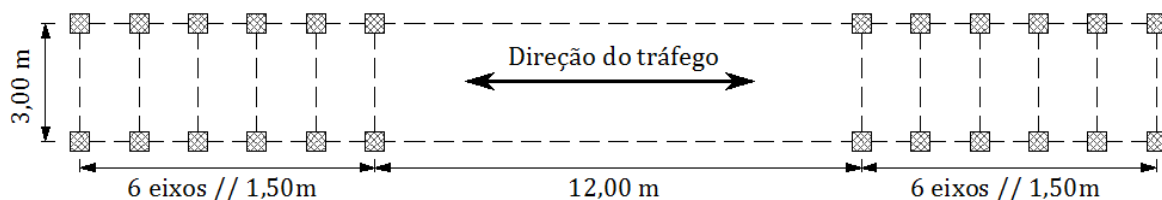


Figura 3.17 – Veículo especial composto por 12 eixos com peso de 200 kN/eixo

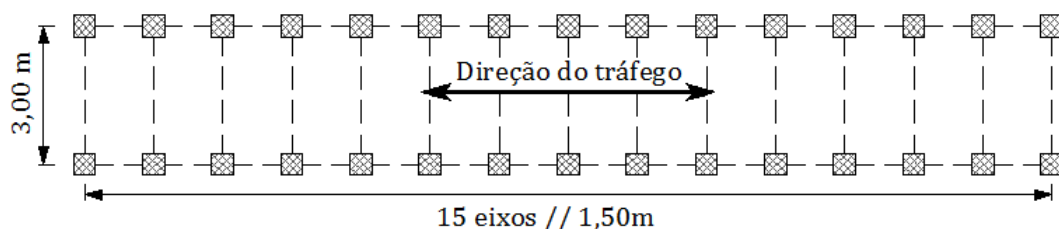


Figura 3.18 – Veículo especial composto por 15 eixos com peso de 200 kN/eixo

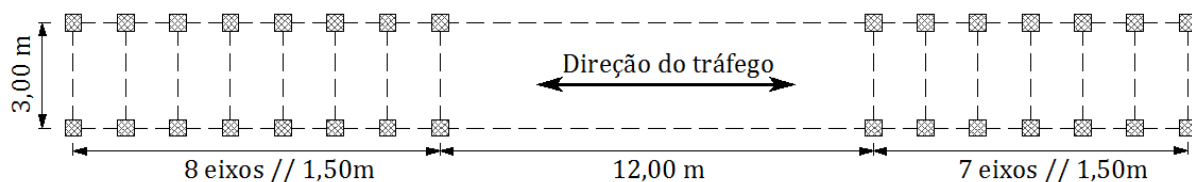


Figura 3.19 – Veículo especial composto por 15 eixos com peso de 200 kN/eixo

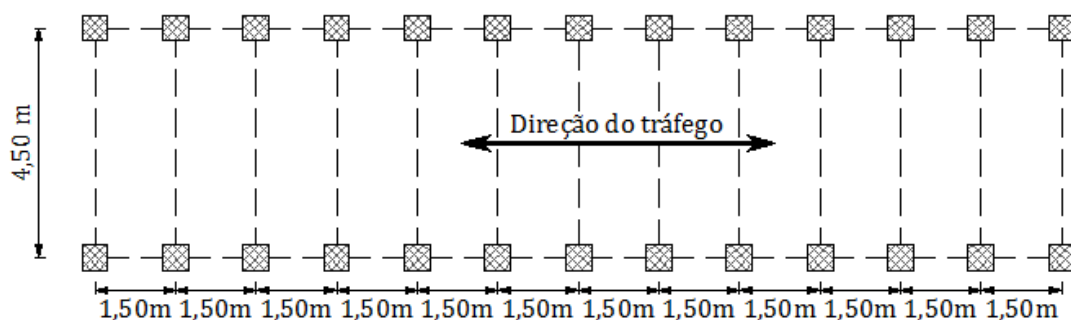


Figura 3.20 – Veículo especial composto por 12 eixos com peso de 240 kN/eixo, mais um eixo de peso igual a 120 kN

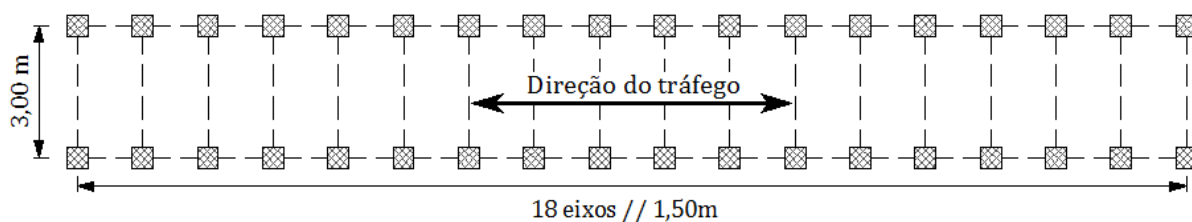


Figura 3.21 – Veículo especial composto por 18 eixos com peso de 200 kN/eixo

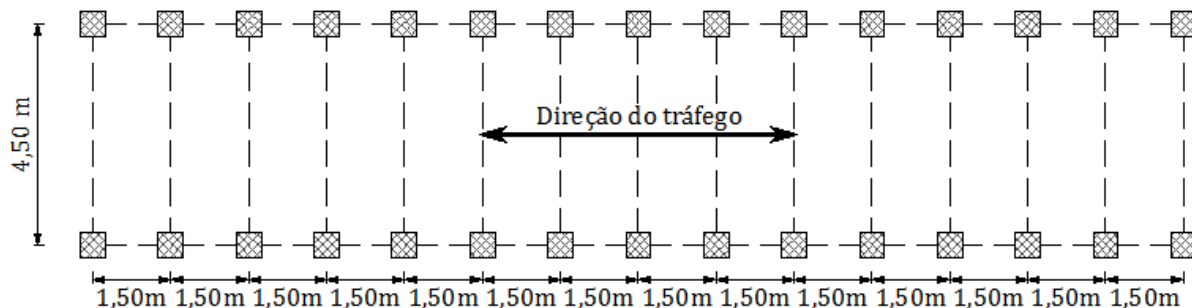


Figura 3.22 – Veículo especial composto por 15 eixos com peso de 240 kN/eixo

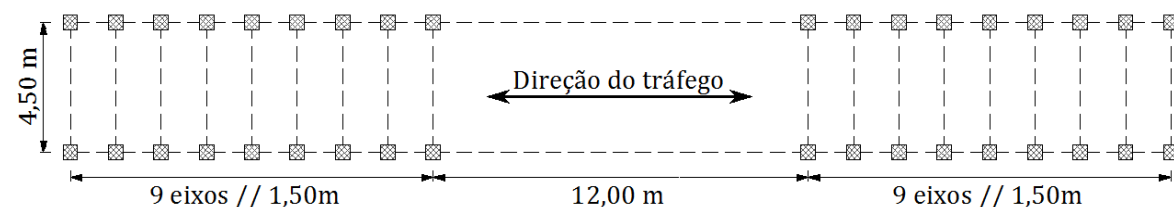


Figura 3.23 – Veículo especial composto por 18 eixos com peso de 200 kN/eixo

O dono de obra é a entidade responsável pela escolha dos veículos especiais a considerar no projeto. Em Portugal, na ponte da Lezíria sobre o rio Tejo, na A10, que liga o Carregado a Benavente, um dos últimos projetos em que foi considerado o EC1, o concessionário (Brisa) definiu que o veículo a considerar seria o de 1800 kN, com afastamento transversal de 3,00 m entre cada roda. O posicionamento do veículo no tabuleiro foi criteriosamente escolhido de forma a provocar os esforços de menor valor.

Tendo em conta a enorme quantidade de veículos definidos na norma e por a escolha destes ser feita pelo dono de obra, não se considerará este modelo de sobrecarga no estudo comparativo realizado.

3.3.3.4 Modelo de carga 4 (*Load Model4* – LM4)

O quarto modelo de sobrecarga definido no EC1, designado por LM4, pretende representar as ações estáticas e dinâmicas de um grande volume de veículos correntes, sendo estas ações aproximadas por uma carga distribuída em todo o tabuleiro, com intensidade de 5,0 kN/m². Como referido, este valor já inclui a amplificação dinâmica causada pelo tráfego.

O LM4 considera-se em situações transitórias de projeto, sendo relevante unicamente para pontes localizadas em zonas urbanas. Este modelo só deve ser considerado caso o LM1 não seja condicionante, ou caso não seja possível aplicá-lo. Tendo em conta estes aspetos, não irá ser considerado este modelo de sobrecarga no estudo comparativo.

3.4 Norma norte-americana (AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications*)

3.4.1 Generalidades

A AASHTO (sigla da *American Association of State Highway and Transportation Officials*) é a organização norte-americana que promove a elaboração de normas, protocolos e especificações usadas no projeto de obras rodoviárias nos Estados Unidos da América. Para o projeto de pontes, a AASHTO adota a norma *Bridge Design Specifications*, que se baseia na metodologia do *Load and Resistance Factor Design* (LRFD) [Miller, 2007].

A norma norte-americana utiliza as unidades de comprimento e de força em uso nos EUA (*ft* e *kip*). Para facilitar a comparação de dados e resultados, converteram-se estas unidades de comprimento e de força para o sistema internacional (SI), *metro* e *newton*, respetivamente.

3.4.2 Definição do número de vias

A norma norte-americana também prevê a divisão do tabuleiro em vias fictícias. Tal como acontece na norma europeia, w representa a largura total entre lancis.

A norma estabelece três critérios para se proceder à divisão transversal do tabuleiro. O primeiro é aplicado a tabuleiros estreitos, com largura entre lancis inferior a 3,66 m. Neste caso deve assumir-se um número de vias fictícias igual ao número de vias de tráfego. No segundo critério indica-se que se devem considerar duas vias fictícias, com largura $w/2$ para cada via, caso o valor de w esteja compreendido entre 6,10 m e 7,32 m. O último critério considera o número de vias fictícias igual à inteira parte da divisão de w por 3,66 m.

Tabela 3.6 – Número e largura das vias da AASHTO

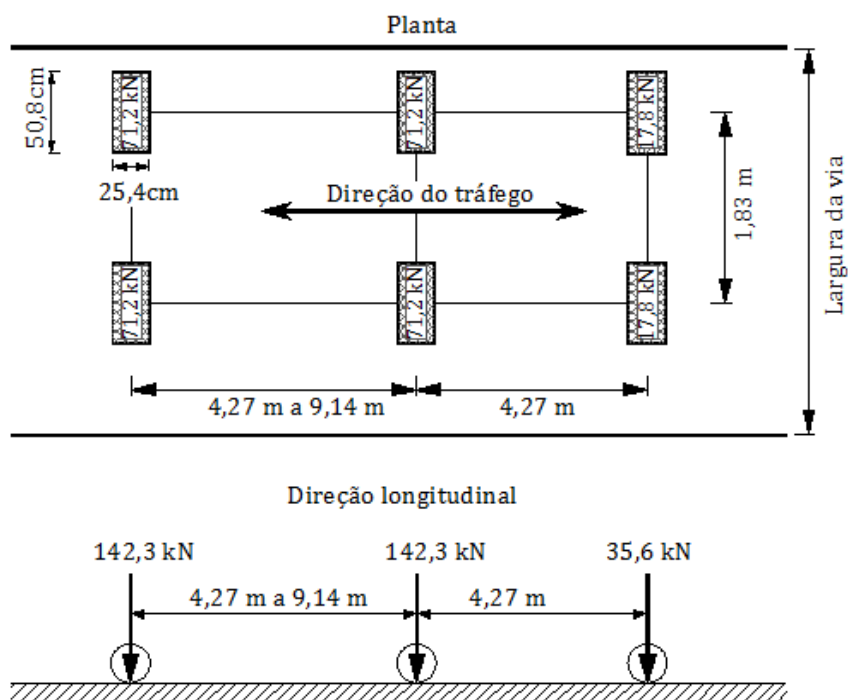
Largura entre lancis - w , ou largura das vias de tráfego - w_{vt}	Número de vias- n	Largura da via- w_v
$w_{vt} < 3,66$ m	$n = \text{número vias de tráfego}$	w_{vt}
$6,10 \text{ m} < w < 7,32$ m	$n = 2$	$\frac{w}{2}$
w qualquer, exceto se compreendido entre 6,10 m e 7,32 m	$n = \text{Int}\left(\frac{w}{3,66}\right)$	$\frac{w}{\text{Int}\left(\frac{w}{3,66}\right)}$

3.4.3 Modelos de sobrecarga

A norma norte-americana define um modelo de sobrecargas, designado por HL-93 (Highway Loading, de 1993), que considera dois veículos pesados (o H20-44 e o HS20-44) juntamente com um conjunto de camiões próximos (H15).

3.4.3.1 Veículo HS20-44 (*Truck* HS20-44)

O veículo HS20-44 é composto por três eixos de duas rodas, com um afastamento transversal de 1,83 m. As rodas dos eixos traseiro e intermédio têm uma carga de 71,2 kN cada. Os eixos têm um afastamento variável, entre 4,27 m e 9,14 m. O eixo dianteiro está 4,27 m afastado do eixo intermédio e é constituído por duas rodas com 17,8 kN cada. A área de contacto de cada roda com a superfície do pavimento é retangular, com dimensões de 50,8 cm por 25,4 cm, como ilustra a figura 3.24.



Nota: as dimensões em planta não estão proporcionais de modo a simplificar a representação.

Figura 3.24 – Representação do veículo HS20-44, em planta e na direção longitudinal

3.4.3.2 Veículo H20-44 (*Tandem* H20-44)

O veículo H20-44 é constituído por 4 rodas, com 55,6 kN cada, distribuídas por 2 eixos. O afastamento dos eixos é de 1,22 m, sendo o afastamento transversal de 1,83 m entre cada roda. Tal como o veículo HS20-44, a geometria da superfície de contacto das rodas é retangular e de dimensões de 50,8 cm por 25,4 cm, como indica a figura 3.25.

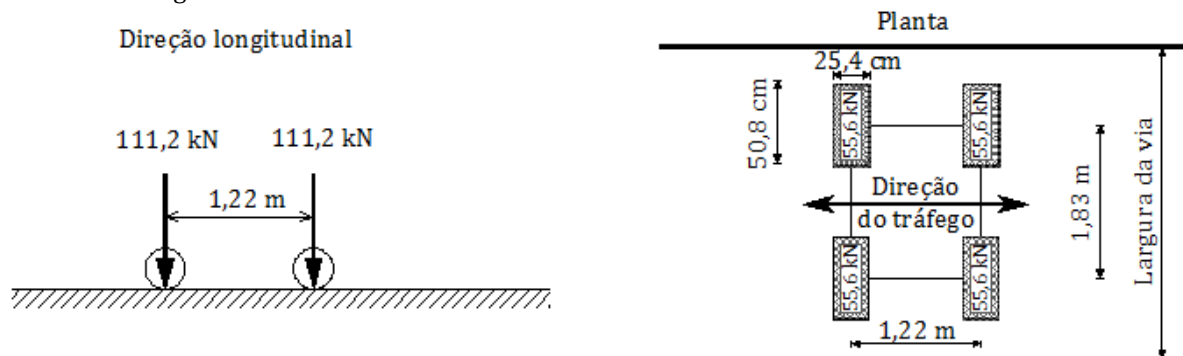


Figura 3.25 – Representação do veículo H20-44, em planta e na direção longitudinal

3.4.3.3 Sobrecarga uniforme (*Lane Load* q_u)

A sobrecarga uniforme pretende simular as ações devidas a um conjunto de camiões H15, de 15 toneladas cada, a que corresponde uma carga uniformemente distribuída de 9,3 kN/m na direção longitudinal, por via. Transversalmente, a sobrecarga diz respeito a uma largura máxima de 3,05 m por cada via. Assim, a intensidade da sobrecarga uniforme é de 3,1 kN/m² até uma largura máxima de 3,05 m por via. A figura 3.26 apresenta um exemplo de aplicação desta sobrecarga num tabuleiro genérico com duas vias fictícias.

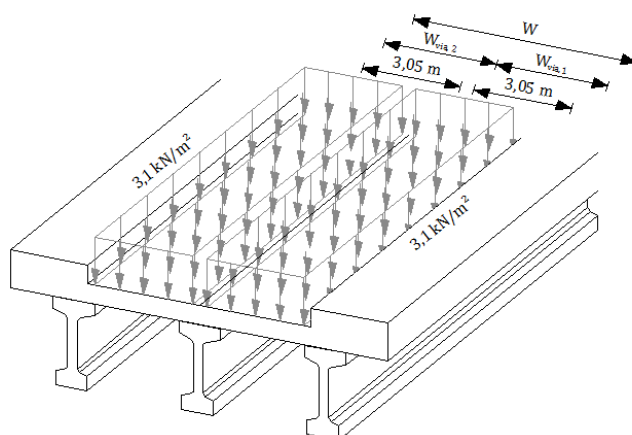


Figura 3.26 – Exemplo de distribuição da sobrecarga uniforme nas direções transversal e longitudinal de um tabuleiro genérico com duas vias de largura w_{via} superior a 3,05 m

3.4.4 Sobrecargas a considerar

Os modelos de sobrecargas a considerar, para efeitos de dimensionamento, correspondem à combinação que causar os efeitos mais desfavoráveis de entre os dois seguintes: veículo HS20-44 e sobrecarga uniforme; e veículo H20-44 e sobrecarga uniforme. Assim, os modelos a considerar têm a configuração longitudinal apresentada nas figuras 3.27 e 3.28.

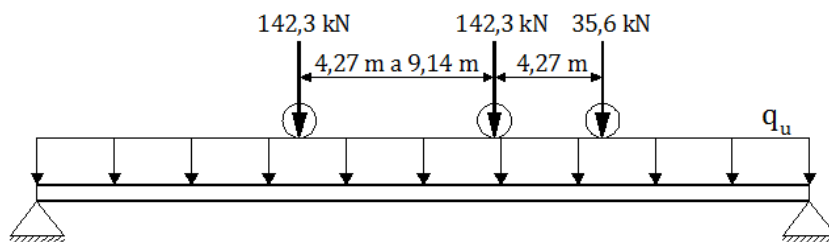


Figura 3.27 – Modelo de sobrecargas constituído pelo veículo HS20-44 e pela sobrecarga uniforme q_u num tramo apoiado

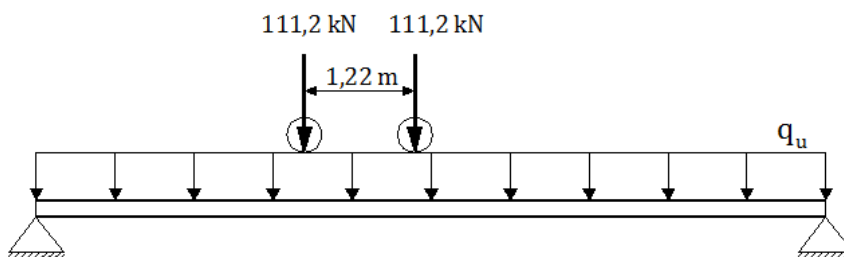


Figura 3.28 – Modelo de sobrecargas constituído pelo veículo H20-44 e pela sobrecarga uniforme q_u num tramo apoiado

Numa análise longitudinal, para obter o máximo momento positivo ou o máximo esforço transversal no vão, considera-se apenas o modelo mais gravoso dos dois indicados anteriormente. Contudo, para a obtenção do máximo momento fletor negativo consideram-se apenas 90% dos esforços causados pela atuação simultânea da carga uniformemente distribuída e de dois veículos HS20-44. O afastamento longitudinal entre o eixo traseiro e o eixo dianteiro dos veículos deverá tomar um valor igual ou superior a 15,24 m e a distância entre os eixos deverá ser de 4,27 m. Na figura 3.29 representa-se a distribuição de cargas para calcular o momento fletor negativo no segundo apoio de um tabuleiro com 3 vãos, sendo as cargas definidas para uma via fictícia.

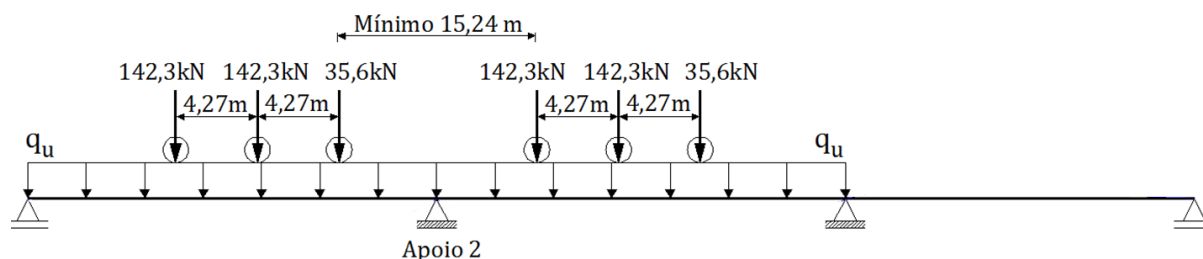


Figura 3.29 – Exemplo da distribuição das cargas para cálculo do momento negativo máximo, considerando a AASHTO

Numa análise transversal, os veículos devem ser posicionados a uma distância mínima de 30 cm do lancil ou, no mínimo, a 60 cm de distância da via fictícia adjacente. A sobrecarga uniforme deve estar colocada de forma a produzir os efeitos mais desfavoráveis.

Tanto na análise transversal como na análise longitudinal, a parcela da sobrecarga que causar uma redução do efeito em análise deverá ser ignorada.

3.4.5 Fator de múltipla presença

Para ter em consideração a ocupação simultânea de veículos nas várias vias, a norma define um fator de múltipla presença com o intuito de diminuir a intensidade das cargas dos veículos, em função do número de vias fictícias carregadas. Os valores que o fator de múltipla presença pode assumir constam na tabela 3.7. Este fator só deverá afetar as cargas correspondentes aos veículos.

Tabela 3.7 – Fator de múltipla presença da AASHTO

Número de vias carregadas	Fator de múltipla presença - m
1	$m = 1,20$
2	$m = 1,00$
3	$m = 0,85$
>3	$m = 0,65$

3.4.6 Fator de amplificação dinâmica

O fator de amplificação dinâmica (φ) inclui, de forma simplificada, os efeitos dinâmicos do tráfego nos modelos de sobrecargas a considerar estaticamente. Este fator é função das características do tabuleiro e do estado limite analisado, aplicando-se apenas aos veículos tipo (Tabela 3.8).

Tabela 3.8 – Fator de amplificação dinâmica da AASHTO

Características	Fator de amplificação dinâmica - φ
Tabuleiros simplesmente apoiados: <ul style="list-style-type: none"> Todos os estados limites 	$\varphi = 1,75$
Para outros casos: <ul style="list-style-type: none"> Estado limite de fadiga ou fratura Restantes estados limites 	$\varphi = 1,15$ $\varphi = 1,33$

Apesar de no presente trabalho não serem considerados estados limites, optou-se por adotar um fator de amplificação dinâmica $\varphi=1,33$ por ser o que melhor se ajusta ao tipo de análise realizada.

3.5 Norma sul-africana (SATCC *Code of Practice for the Design of Road Bridges and Culverts*)

3.5.1 Generalidades

A SATCC (*Southern Africa Transport and Communications Commission*) é responsável pela elaboração da regulamentação da área dos transportes e vias de comunicação na África do Sul. As normas uniformizadas dos países pertencentes à SADC (*Southern Africa Development Community*) foi desenvolvida pela SATCC, aplicando-se ao projeto de estruturas rodoviárias o *Code of Practice for the Design of Road Bridges and Culverts* [Jones, 2002].

3.5.2 Definição do número de vias

Tal como as duas normas anteriores, a sul-africana também considera a largura da faixa de rodagem e bermas (w_{fr}), subtraída da largura de eventuais separadores, dividida em vias fictícias. Na tabela 3.9 definem-se os critérios de divisão em vias fictícias, nomeadamente o número de vias (n), que é função da largura w_{fr} .

Tabela 3.9 – Definição do número de vias fictícias na SATCC

Largura das faixas de rodagem e bermas – w_{fr}	Número de vias - n
$w_{fr} \leq 4,80$ m	$n = \text{Int}\left(\frac{w_{fr}}{3}\right)$
$4,80 \text{ m} < w_{fr} \leq 7,40$ m	$n = 2$
$7,40 \text{ m} < w_{fr} \leq 11,10$ m	$n = 3$
$11,10 \text{ m} < w_{fr} \leq 14,80$ m	$n = 4$
$14,80 \text{ m} < w_{fr} \leq 18,50$ m	$n = 5$
$18,50 \text{ m} < w_{fr} \leq 22,00$ m	$n = 6$

Para os tabuleiros com largura das faixas de rodagem e bermas maior que 4,80 m, a largura da via deve estar entre os 2,40 m e os 3,70 m. A largura da via deve ser igual em todas as vias fictícias e o número destas deve ser o mínimo para o tabuleiro em estudo.

3.5.3 Modelos de sobrecarga

A SATCC define os três seguintes modelos de sobrecarga:

- NA (*Normal Loading- NA*)
- NB (*Abnormal Loading- NB*)
- NC (*Super Loading- NC*)

Cada modelo de sobrecarga deve ser aplicado separadamente. O modelo a considerar para o dimensionamento corresponde ao que produzir os efeitos mais desfavoráveis para o elemento estrutural em análise.

3.5.3.1 Modelo de sobrecarga NA (*Normal Loading - NA*)

O modelo de sobrecarga NA pretende representar o tráfego normal. Este modelo de sobrecarga é composto por dois submodelos distintos. O primeiro submodelo é constituído por uma sobrecarga linear distribuída longitudinalmente NA(1) e por uma sobrecarga pontual NA(2), e o segundo submodelo é composto apenas por uma sobrecarga pontual NA(3).

A sobrecarga linearmente distribuída NA(1) pretende simular um conjunto de veículos, sendo constituída por duas cargas de faca paralelas e de valor igual, aplicadas na direção do eixo da via. Cada carga tem um valor de $Q_a/2$, em que Q_a varia com o comprimento contínuo carregado (L).

Tabela 3.10 – Valor característico da carga NA (1) na SATCC

Comprimento contínuo carregado - L [m]*	Q_a [kN/m]
$L < 36$	36
$L \geq 36$	$\frac{180}{\sqrt{L}} + 6$

* $L = L_{\text{vãos carregados consecutivos}} \times n$

Deverá ser considerado esta carga em cada via do tabuleiro. A figura 3.30 apresenta um exemplo deste carregamento em duas vias fictícias de um tabuleiro.

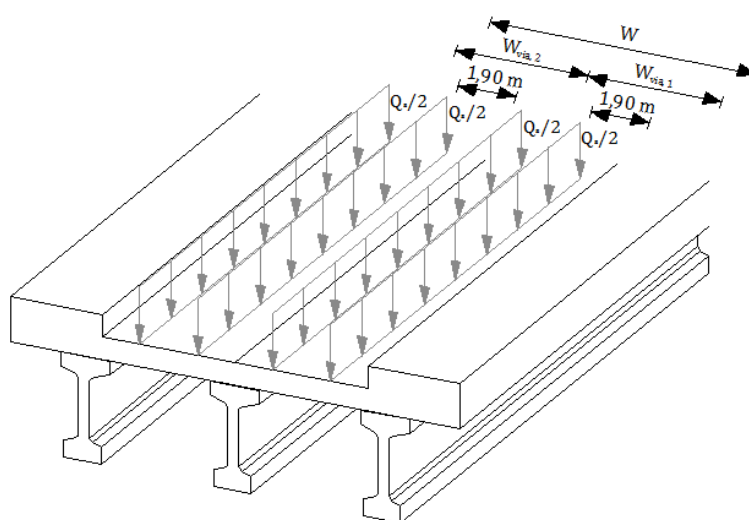


Figura 3.30 – Carregamento do tipo NA (1) num tabuleiro genérico

A sobrecarga NA (2) consiste num eixo composto por duas forças pontuais, cuja posição coincide com a posição da sobrecarga linear NA (1). A intensidade de cada eixo varia consoante o número da via carregada, de acordo com a função $\frac{144}{\sqrt{n}}$ kN por via, em que o n é o número da via. Assim, na primeira via considera-se o valor $\frac{144}{\sqrt{1}}$ kN, na segunda via toma-se o valor $\frac{144}{\sqrt{2}}$ kN e assim sucessivamente.

A sobrecarga NA (3) é composta por um eixo de duas rodas com 100 kN de intensidade, afastadas, no mínimo, 1,00 m. A área de contacto (quadrada ou circular) da roda com o pavimento é de 0,10 m². O eixo é posicionado em qualquer direção e em qualquer local da faixa de rodagem e bermas.

Em tabuleiros com largura w_{fr} inferior a 3,00 m não devem ser consideradas as sobrecargas definidas por cargas pontuais.

Transversalmente o carregamento NA (1) pode ocupar qualquer posição na via, desde que se assegure uma distância de 1,90 m entre as cargas distribuídas da mesma via e uma distância mínima de 0,25 m do lancil. No submodelo NA (2) deve considerar-se o mesmo posicionamento transversal das cargas distribuídas. Os carregamentos de cada via devem distanciar-se, no mínimo, 0,50 m.

3.5.3.2 Modelo de sobrecarga NB (Abnormal Loading - NB)

O modelo de sobrecargas NB pretende simular a ação de um veículo especial através de um conjunto de cargas pontuais. O veículo é composto por 4 eixos de 4 rodas cada um, perfazendo um total de 16 rodas. O afastamento transversal das rodas é de 1,00 m. O afastamento longitudinal entre os 2 eixos extremos é fixa e igual a 2,00 m, enquanto que a distância entre os eixos intermédios é variável, tomando os valores de 6,00 m, 11,00 m, 16,00 m, 21,00 m ou 26,00 m (Figura 3.31), por forma a obter os efeitos mais desfavoráveis no elemento estrutural em análise.

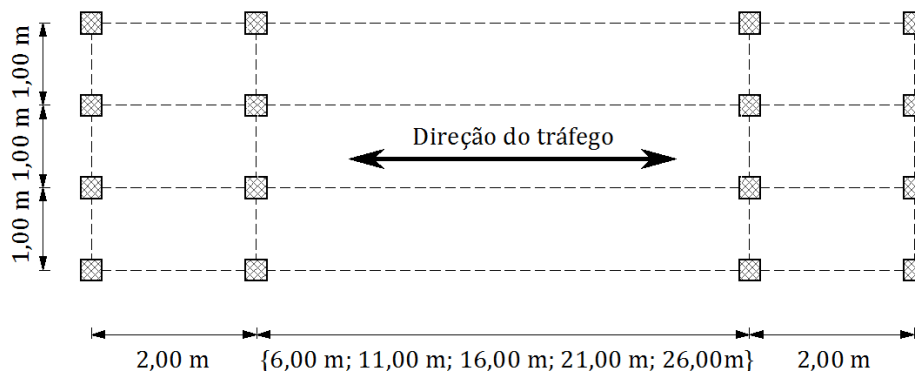


Figura 3.31 – Geometria do veículo do modelo NB da SATCC

Para tabuleiros largos a norma define o *NB Loading 36* e para tabuleiros estreitos considera o *NB Loading 24*, da seguinte forma:

- *NB Loading 24*: considera-se um veículo com carga total de 960 kN, tendo cada roda 60 kN. A superfície de contacto com o pavimento deve ser quadrada ou circular. Caso seja circular, o diâmetro deve ter 0,28 cm. No caso de ser quadrada, cada lado deve ter 0,25 cm. Neste estudo considera-se este carregamento para tabuleiros com largura menor que 14,00 m.
- *NB Loading 36*: considera-se um veículo com carga total de 1440 kN, tendo cada roda 90 kN. A superfície de contacto com o pavimento deve ser quadrada ou circular. Caso seja circular, o diâmetro deve ter 0,34 cm. No caso de ser quadrada, cada lado deve ter 0,30 cm. Neste estudo considera-se este carregamento para tabuleiros com largura maior que 14,00 m.

O veículo pode ocupar qualquer posição transversal no tabuleiro, desde que esteja a uma distância mínima de 0,60 m do lancil. Caso o passeio tenha uma largura inferior a 0,60 m, a distância mínima ao lancil é de 0,15 m.

3.5.3.3 Modelo de sobrecarga NC (Super Loading - NC)

O modelo de sobrecarga NC pretende simular os efeitos de veículos com reboques de suspensão hidráulica e transportadores de cargas muito elevadas (*Standard Type NC-30 x 5 x 40*).

Na figura 3.32 está representada a geometria em planta do carregamento. Nas áreas sombreadas considera-se uma carga uniformemente distribuída de 30 kN/m².

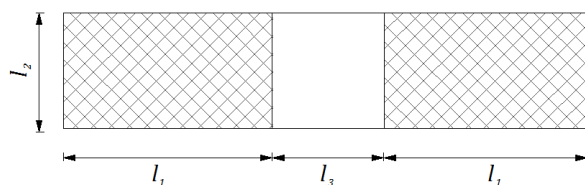


Figura 3.32 – Modelo de sobrecarga NC (carga distribuída de 30 kN/m²)

Tabela 3.11 – Dimensões do veículo NC

Distância	Valor [m]
Long. l_1	{5,00; 10,00; 15,00; 20,00}
Transv. l_2	{3,00; 4,00; 5,00}
Long. l_3	{0; 5,00; 10,00; 15,00; 20,00; 25,00}

Os valores de l_1 , l_2 e l_3 devem ser escolhidos, dentro da gama pré-definida, de forma a obter os efeitos mais desfavoráveis no elemento estrutural em análise. No entanto, a escolha destes valores é condicionada pelo tipo de obra e pelas condições do tráfego local, cabendo ao dono de obra a sua definição. Por este motivo este modelo de sobrecarga não será considerado no presente trabalho.

3.6 Norma brasileira (ABNT NBR 7188)

3.6.1 Generalidades

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) é responsável pela elaboração de normas e especificações no Brasil. Para o projeto de pontes a ABNT existe a norma ABNT NBR 7188, de 1970, que foi atualizada em 1982, 1987 e 2003. As normas NBR não são de utilização obrigatória, ficando ao critério do dono de obra a escolha da norma a utilizar em projeto [Cavalcanti, 2004]. Contudo, na prática é a utilizada correntemente no Brasil.

3.6.2 Classes das obras

A norma define as sobrecargas a considerar para as pontes rodoviárias e pedonais. No que diz respeito às pontes rodoviárias, a norma divide as pontes em 3 classes, a 45, a 30 e a 12, a que estão associadas veículos tipo com cargas totais de 450 kN, 300 kN e 120 kN, respetivamente.

No presente trabalho considera-se apenas a classe 45, por se tratar da classe cujas sobrecargas têm maior intensidade.

3.6.3 Modelos de sobrecarga

O modelo de sobrecarga consiste na aplicação simultânea de uma carga uniformemente distribuída e de um veículo tipo de geometria parecida com o veículo tipo do RSA. Os valores das cargas para as diferentes classes estão indicados na tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Cargas dos veículos distribuídas da ABNT

Classe da obra	Veículo [kN]	Carga uniforme distribuída
		p [kN/m ²]
Classe 45	450,0	5,0
Classe 30	300,0	5,0
Classe 12	120,0	4,0

O veículo ocupa uma área retangular de 6,00 m por 3,00 m para as três classes da norma (Figuras 3.33 e 3.34). A tabela 3.13 estabelece os restantes valores a considerar para os veículos.

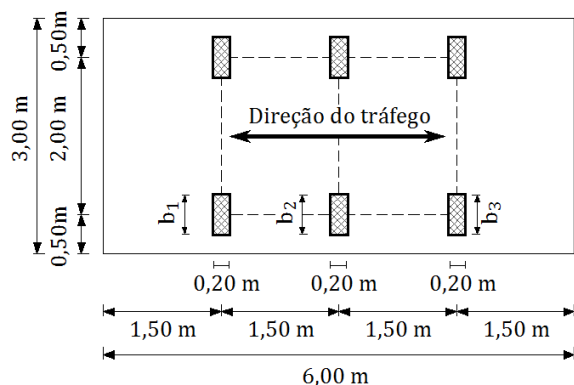


Figura 3.33 - Planta dos veículos das classes 45 e 30 da ABNT

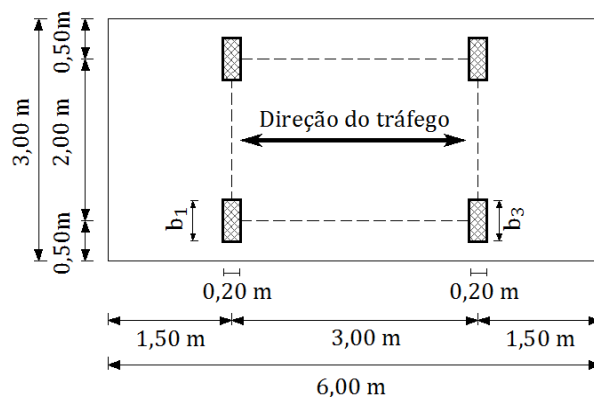


Figura 3.34 - Planta do veículo da classe 12 da ABNT

Tabela 3.13 - Características dos veículos definidos na ABNT

Características	Unid.	Classe 45	Classe 30	Classe 12
Quantidade de eixos	Eixo	3	3	2
Peso total do veículo	kN	450,0	300,0	120,0
Peso total de cada roda dianteira	kN	75,0	50,0	20,0
Peso total de cada roda traseira	kN	75,0	50,0	40,0
Peso total de cada roda intermédia	kN	75,0	50,0	-
Largura de contacto b_1 das rodas dianteiras	m	0,50	0,40	0,20
Largura de contacto b_3 das rodas traseiras	m	0,50	0,40	0,30
Largura de contacto b_2 das rodas intermédias	m	0,50	0,40	-
Comprimento de contacto de cada roda	m	0,20	0,20	0,20
Áreas de contacto de cada roda	m ²	$0,20 \times b_x$	$0,20 \times b_x$	$0,20 \times b_x$
Distância longitudinal entre eixos	m	1,50	1,50	3,00
Distância transversal entre eixos	m	2,00	2,00	2,00

Os valores b_1 , b_2 e b_3 referem-se às figuras 3.33 e 3.34.

A sobrecarga uniforme p deve ser considerada em toda a área do tabuleiro, retirando unicamente a área fictícia ocupada pelo veículo tipo. A figura 3.35 representa a distribuição da carga p na superfície do tabuleiro.

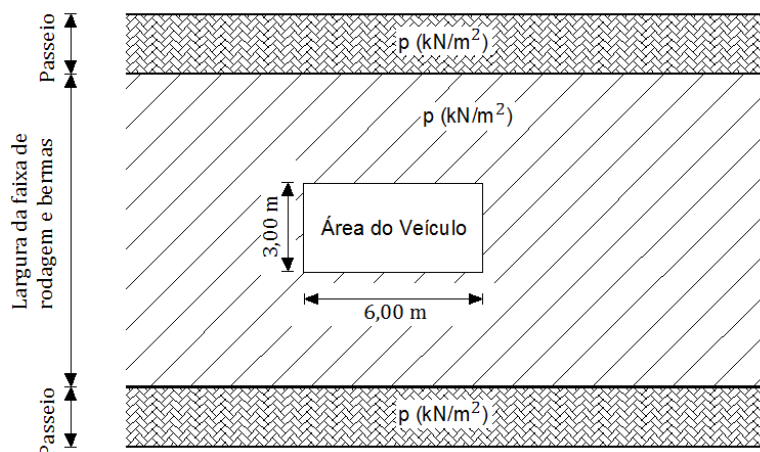


Figura 3.35 - Configuração em planta das sobrecargas na faixa de rodagem, bermas e nos passeios, segundo a ABNT

3.6.4 Fator de amplificação dinâmica

As sobrecargas do modelo devem ser afetadas pelo fator de amplificação dinâmico (φ), exceto nas sobrecargas colocadas nos passeios. Esse fator é calculado pela seguinte expressão:

$$\varphi = 1,4 - 0,007 \times L \geq 1$$

sendo L o vão carregado. Em tabuleiros contínuos, no caso de o menor vão ser igual ou superior a 70% do maior vão, pode considerar-se um L equivalente igual à média aritmética dos vãos.

3.7 Comparação genérica de alguns aspetos das normas

As normas descritas definem alguns modelos de sobrecarga idênticos entre si. As normas europeia, norte-americana e sul-africana dividem a largura das faixas de rodagem e bermas em vias fictícias, nas quais são aplicados os modelos de sobrecargas. As normas europeia e sul-africana consideram modelos de sobrecargas, constituídos por veículos tipo, essencialmente para análise dos efeitos locais.

O RSA considera dois modelos diferentes de sobrecargas. Uma representa uma carga uniformemente distribuída em toda a área da faixa de rodagem e bermas juntamente com uma carga de faca distribuída transversalmente. O outro modelo de sobrecarga é constituído por um veículo tipo. Estes dois modelos de sobrecarga completam-se, pois permitem analisar esforços globais e locais. A norma brasileira define um único modelo de sobrecarga, que considera uma carga distribuída em todo o tabuleiro, exceto na área onde é posicionado o veículo tipo. Assim, o RSA e a ABNT definem modelos de sobrecargas com algumas semelhanças. Ambos consideram uma carga uniformemente distribuída associada a outras cargas, de faca distribuída na direção transversal, no caso do RSA, e um veículo tipo, no caso da ABNT. Apesar de ter uma carga total maior, o veículo tipo do RSA tem uma geometria igual ao veículo tipo das classes 45 e 30 da ABNT. Dado o número reduzido de modelos definidos e as suas características de aplicação, considera-se que as sobrecargas rodoviárias do RSA e da ABNT são intuitivas e fáceis de aplicar.

As restantes normas contemplam modelos de sobrecargas mais complexos, apesar de se ajustarem melhor aos efeitos do tráfego real. No caso da norma norte-americana, a divisão em vias fictícias é pouco clara, além de que define fatores de amplificação dinâmica e de múltipla presença que podem induzir em erros de aplicação. A norma sul-africana define uma divisão por vias fictícias mais perceptível, apesar da determinação dos valores dos modelos de sobrecargas NA(1) e NA(2) ser complexa e poder conduzir, assim, a erros de aplicação. O EC1, tal como a SATCC, tem um critério simples na divisão do tabuleiro em vias fictícias. No entanto, ao contrário da norma sul-africana, simplifica o método de aplicação das sobrecargas nas vias fictícias que, ainda assim, é de mais difícil aplicação dada a necessidade de se considerarem cargas com diferentes intensidades em cada via.

A consideração dos efeitos dinâmicos do tráfego é feita de forma explícita ou implícita. As normas norte-americana e brasileira consideram um fator dinâmico a aplicar aos modelos de sobrecarga, enquanto que na SATCC e no RSA essa amplificação dinâmica está já considerada nos modelos de sobrecarga. No caso do EC1, a amplificação dinâmica inclui-se nos modelos de carga LM1, LM3 e LM4. No caso do modelo de carga LM2, considera-se um fator dinâmico para as cargas estáticas desse modelo. A consideração dos efeitos dinâmicos está incluída nos modelos de sobrecargas do RSA, SATCC e EC1, mas nas normas norte-americana e brasileira dependem, embora de forma simplificada, das características estruturais da obra.

O RSA e a ABNT, que definem as sobrecargas com modelos de carga simples e de fácil aplicação, estão desajustadas ao tráfego real. A AASHTO e a SATCC apresentam modelos mais complexos e de difícil aplicação, mas apresentam a vantagem de serem normas atuais. Também o EC1 é uma norma atual que, ao contrário das normas norte-americana e sul-africana, define as sobrecargas com modelos mais simples, pelo que se considera ser a norma mais interessante para a definição das sobrecargas rodoviárias.

Capítulo 4

Escolha dos casos de estudo

4.1 Considerações gerais

Neste capítulo são descritos os cinco casos de estudo que pretendem representar tabuleiros comuns em laje vigada. A finalidade é obter os esforços induzidos pelas sobrecargas definidas nas normas apresentadas no Capítulo 3 e proceder à sua comparação. Recorrendo-se ao programa de elementos finitos SAP2000®, foram construídos modelos compostos por elementos de barra (*frames*) e por elementos de casca (*shell*), com o objetivo de simular o comportamento das vigas e das lajes, respetivamente. Considerou-se o betão da classe C30/37 em todos os tabuleiros, tendo sido fornecidas ao programa de cálculo automático os parâmetros elásticos que lhe são inerentes ($E=33$ GPa e $\nu=0,2$).

Os modelos de elementos finitos permitiram realizar análises longitudinais e transversais. Na análise longitudinal foram calculados, nas vigas principais, os momentos fletores negativos e positivos máximos e o esforço transverso máximo nos vãos intermédios. Na análise transversal foram determinados o momento fletor máximo na consola e os momentos fletores positivos e negativos máximos nos painéis de laje interiores.

Os casos de estudos 1 e 2 referem-se a tabuleiros com duas vigas principais, betonadas “*in-situ*”, utilizadas frequentemente em viadutos correntes. Os casos de estudo 3 a 5 dizem respeito a tabuleiros constituídos com vigas pré-fabricadas, com diferentes afastamentos entre si, pretendendo representar soluções comuns em passagens desniveladas e viadutos de médio vão.

De seguida apresentam-se os tabuleiros a analisar e os respetivos modelos de elementos finitos, assim como a justificação dos exemplos escolhidos.

4.2 Características idênticas dos modelos numéricos

São inicialmente apresentadas as características comuns a todos os modelos numéricos, de forma a evitar repetir informação. Assim serão referidas as condições de apoio dos modelos, as restrições dos deslocamentos e rotações consideradas entre carlingas, vigas e lajes, bem como a distribuição espacial dos elementos estruturais.

Deve-se referir-se que todos os elementos estruturais foram colocados de forma aproximada no seu centro de gravidade, o que corresponde a uma simplificação nos casos de secção variável e de variações muito pequenas entre elementos consecutivos. Esta simplificação foi adotada de forma a reduzir o esforço de cálculo e eliminar a possibilidade de erros na construção do modelo.

As restrições dos deslocamentos e rotações entre os pontos coincidentes das carlingas, vigas e lajes foram efetuadas através de *constraints* do tipo *body*, que implica que os deslocamentos e rotações sejam iguais

entre os pontos de ligação entre carlingas, vigas e lajes. Estes elementos foram considerados em todas as ligações entre os elementos de laje e de viga, já que os centros gravidade se localizam em planos diferentes. Nos modelos numéricos elaborados foi considerado um número total de 2652 *constraints* do tipo *body* semelhantes ao representado na figura 4.1, para assegurar a continuidade de deslocamentos entre os pontos nodais dos diferentes elementos estruturais. Para facilitar este processo foi necessário subdividir alguns elementos de casca de dimensões pré-definidas.

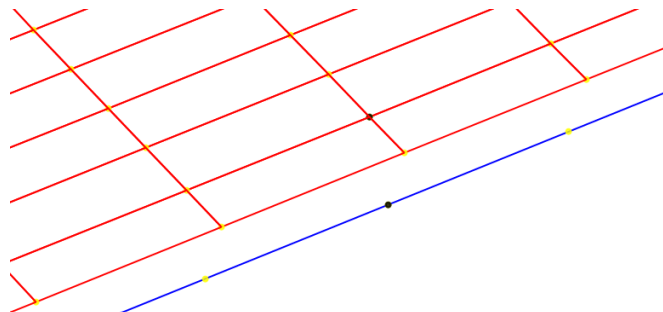


Figura 4.1 – Ilustração de um *constraint* do tipo *body* no programa de cálculo SAP2000®, representando o eixo da viga e o folheto médio da laje.

Consideram-se condições de apoio correspondentes a apoios fixos, que restringem todos os deslocamentos sem limitar as rotações, nos apoios junto aos encontros (Figura 4.2). Nos restantes apoios restringiu-se unicamente o deslocamento vertical, deixando livres os restantes deslocamentos e rotações (Figura 4.2).

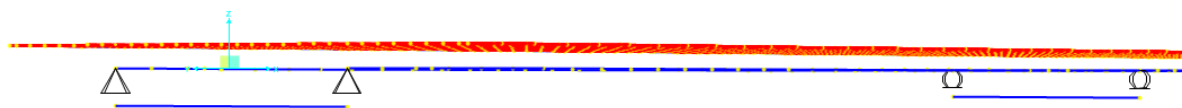


Figura 4.2 – Ilustração dos apoios utilizados

As coordenadas x e y dos modelos correspondem às direções longitudinal e transversal dos tabuleiros, respetivamente.

4.3 Caso de estudo 1

4.3.1 Caracterização estrutural

O caso de estudo 1 representa um tabuleiro de média largura, com duas vigas principais betonadas *in-situ*, com largura de 11,00 m e afastamento de 6,00 m entre as duas vigas. O tabuleiro tem um passeio e uma guarda em cada lado, que ocupam 1,50 m de largura. A faixa de rodagem e bermas têm 8,00 m. Neste caso de estudo consideram-se duas variantes relativamente ao comprimento dos vãos correntes, o que implicou também a consideração de alturas diferentes para as vigas.

4.3.1.1 Variante com 25,00 m de vão corrente

A variante com 25,00 m de vão corrente tem 5 tramos, com vãos extremos de 20,00 m de comprimento. A altura das vigas é de 1,80 m. Junto às secções de apoio nos pilares considerou-se uma variação linear da largura da viga, em 4,00 m (Figura 4.3). A altura das carlingas sobre os pilares é de 1,20 m, sendo a sua largura de 0,60 m.

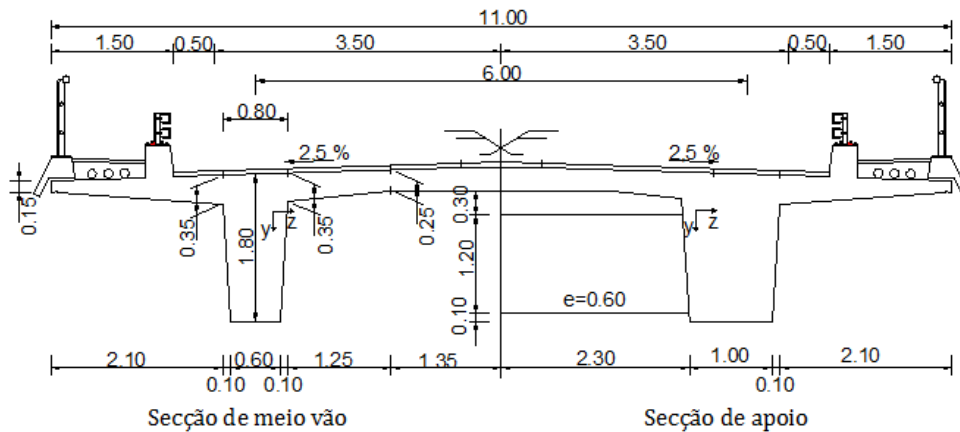


Figura 4.3 – Secção transversal do tabuleiro do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 25,00 m.

4.3.1.2 Variante com 40,00 m de vão corrente

Na variante com 40,00 m de vão corrente os vãos externos são de 32,00 m. A altura das vigas passa para 2,40 m e a carlinga passa a ter 1,60 m de altura (Figura 4.4). A variação linear da largura das vigas, entre o pilar e a zona de vão, tem um comprimento de 6,00 m.

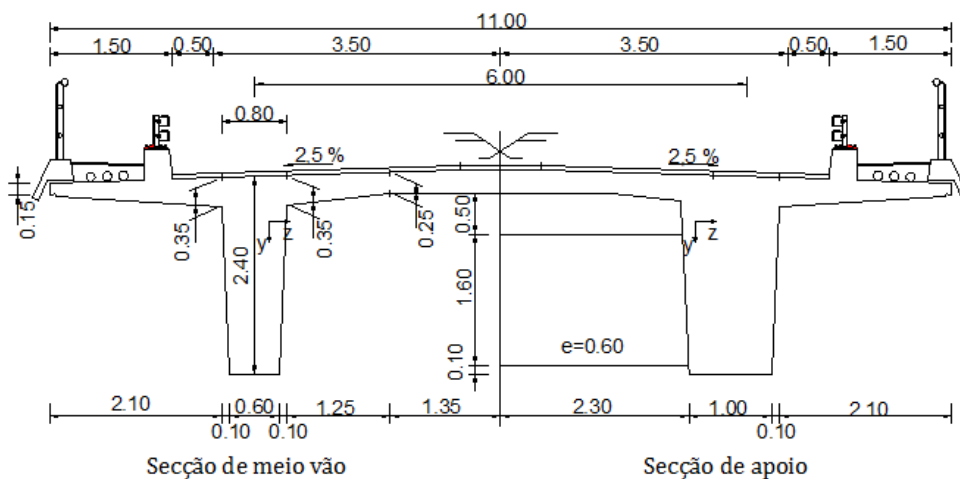


Figura 4.4 – Secção transversal do tabuleiro do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 40,00 m.

4.3.2 Modelos de elementos finitos

O modelo de elementos finitos utilizado simula as carlingas e as vigas com elementos de barra, e as lajes com elementos de casca. Os elementos de casca têm em conta a variação de espessura da laje, tendo-se considerado dimensões em planta de 0,50 m por 1,00 m.

4.3.2.1 Variante com 25,00 m de vão corrente

Os elementos de barra, entre as secções de apoio nos pilares até uma distância de 4,00 m, têm propriedades geométricas variáveis. O modelo é apresentado nas figuras 4.5, 4.6 e 4.7.

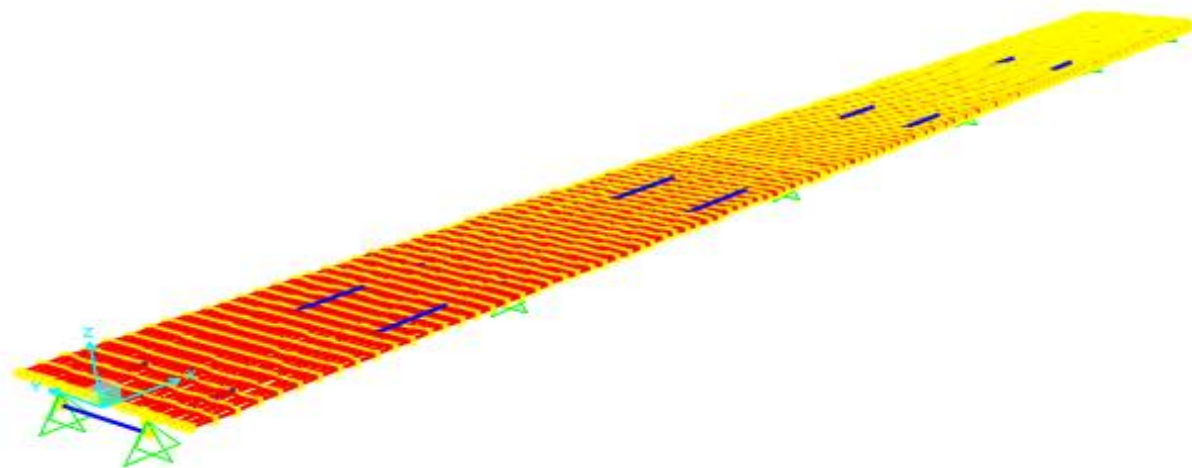


Figura 4.5 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 25,00 m. Perspetiva global.

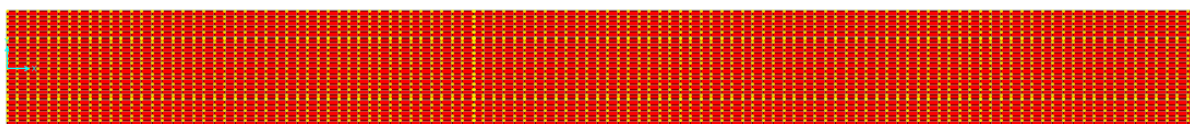


Figura 4.6 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 25,00 m. Vista dos elementos de casca em planta.



Figura 4.7 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 25,00 m. Vista dos elementos de barra em planta.

As tabelas 4.1 e 4.2 apresentam as propriedades dos elementos de barra e de casca considerados.

Tabela 4.1 – Propriedades das vigas do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 25,00 m.

Secção	Coordenadas x [m]	A [m ²]	I _{yy} [m ⁴]	I _{zz} [m ⁴]	J [m ⁴]
Vigas - Apoio	{20, 45, 70, 95}	3,13	3,513	0,948	0,560
Vigas - Vão	{[0,16], [24,41], [49,66], [74,91], [99,115]}	2,54	3,446	0,688	0,212
Carlingas	{0, 20, 45, 70, 95, 115}	0,72	0,022	0,086	0,088

Tabela 4.2 – Propriedades das lajes na secção transversal do tabuleiro do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 25,00 m.

Elementos de casca	Largura [m]	Coordenadas y [m]	Espessura [m]
1 (extremidade da consola)	0,50	{[0;0,5];[10,5;11,0]}	0,174
2	0,50	{[0,5;1,0];[10,0;10,5]}	0,221
3	0,50	{[1,0;1,5];[9,5;10,0]}	0,269
4	0,50	{[1,5;2,0];[9,0;9,5]}	0,317
5	0,20	{[2,5;2,7];[8,8;9,0]}	0,349
6	0,30	{[2,7;3,0];[8,5;8,8]}	0,322
7	0,50	{[3,5;4,0];[8,0;8,5]}	0,282
8	0,50	{[4,5;5,0];[7,5;8,0]}	0,252
9 (eixo do tabuleiro)	0,50	{[5,0;8,0]}	0,250

4.3.2.2 Variante com 40,00 m de vão corrente

Na variante com 40,00 m de vão corrente o comprimento da variação linear da largura das vigas passa de 4,00 m para 6,00 m. Para além disso, não há alterações significativas face ao anterior modelo. As figuras 4.8 a 4.10 fazem diferentes representações dos elementos estruturais do modelo.



Figura 4.8 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 40,00 m. Perspetiva global.

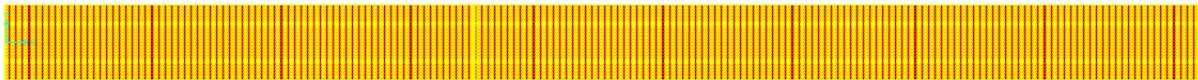


Figura 4.9 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 40,00 m. Vista dos elementos de casca em planta.



Figura 4.10 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 40,00 m. Vista dos elementos de barra em planta.

As tabelas 4.3 e 4.4 apresentam as propriedades os elementos de barra e de casca considerados.

Tabela 4.3 – Propriedade das vigas do tabuleiro do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 40,00 m.

Secção	Coordenadas x [m]	A [m ²]	I _{yy} [m ⁴]	I _{zz} [m ⁴]	J [m ⁴]
Vigas - Apoio	{32, 72, 112, 152}	3,79	3,583	2,130	0,831
Vigas - Vão	{[0,26], [38,66], [78,106], [118,146], [158,184]}	2,96	3,479	1,558	0,283
Carlingas	{0, 32, 72, 112, 152, 184}	0,96	0,205	0,029	0,088

Tabela 4.4 – Propriedades das lajes na secção transversal do tabuleiro do caso de estudo 1, na variante com vãos correntes de 40,00 m.

Elementos de casca	Largura [m]	Coordenadas y [m]	Espessura [m]
1 (extremidade da consola)	0,50	{[0;0,5];[10,5;11,0]}	0,174
2	0,50	{[0,5;1,0];[10,0;10,5]}	0,221
3	0,50	{[1,0;1,5];[9,5;10,0]}	0,269
4	0,50	{[1,5;2,0];[9,0;9,5]}	0,317
5	0,20	{[2,5;2,7];[8,8;9,0]}	0,349
6	0,30	{[2,7;3,0];[8,5;8,8]}	0,322
7	0,50	{[3,5;4,0];[8,0;8,5]}	0,282
8	0,50	{[4,5;5,0];[7,5;8,0]}	0,252
9 (eixo do tabuleiro)	0,50	{[5,0;8,0]}	0,250

4.4 Caso de estudo 2

4.4.1 Caracterização estrutural

O caso de estudo 2 refere-se a um tabuleiro largo, por duas vigas principais betonadas *in-situ*, com largura de 15,00 m e afastamento de 8,20 m entre as duas vigas principais. O tabuleiro tem um passeio e uma guarda em cada lado, que ocupam 1,25 m de largura. A faixa de rodagem e bermas têm 12,50 m de largura total. Como no caso de estudo anterior, consideram-se duas variantes relativamente ao comprimento dos vãos correntes, o que implicou a consideração de alturas diferentes para as vigas.

4.4.1.1 Variante com 25,00 m de vão corrente

Na variante de 25,00 m de vão corrente consideram-se 5 tramos, com vãos extremos de 20,00 m de comprimento. A altura das vigas é de 1,80 m. Considerou-se uma variação linear da largura da viga em 4,00 m, junto ao apoio dos pilares (Figura 4.11). A altura das carlingas sobre os pilares é de 1,20 m, sendo a sua largura de 0,60 m.

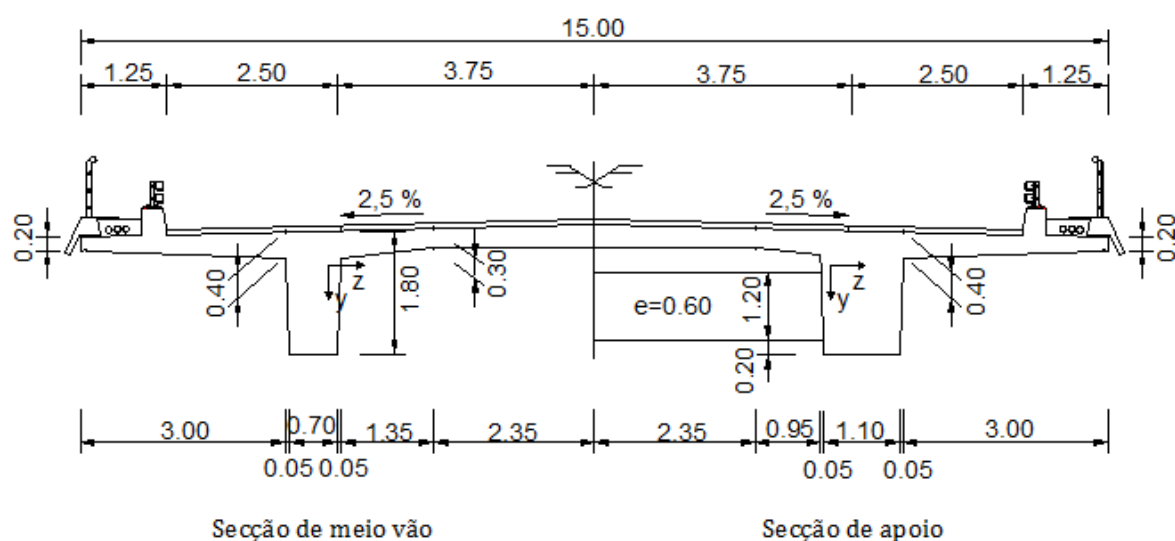


Figura 4.11 – Secção transversal do tabuleiro do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 25,00 m.

4.4.1.2 Variante com 40,00 m de vão corrente

Na variante com 40,00 m de vão corrente os vãos extremos são de 32,00 m. A altura das vigas passa para 2,40 m e a carlinga passa a ter 1,60 m de altura (Figura 4.12). A variação linear da largura das vigas, entre o pilar e a zona de vão, tem um comprimento de 6,00 m.

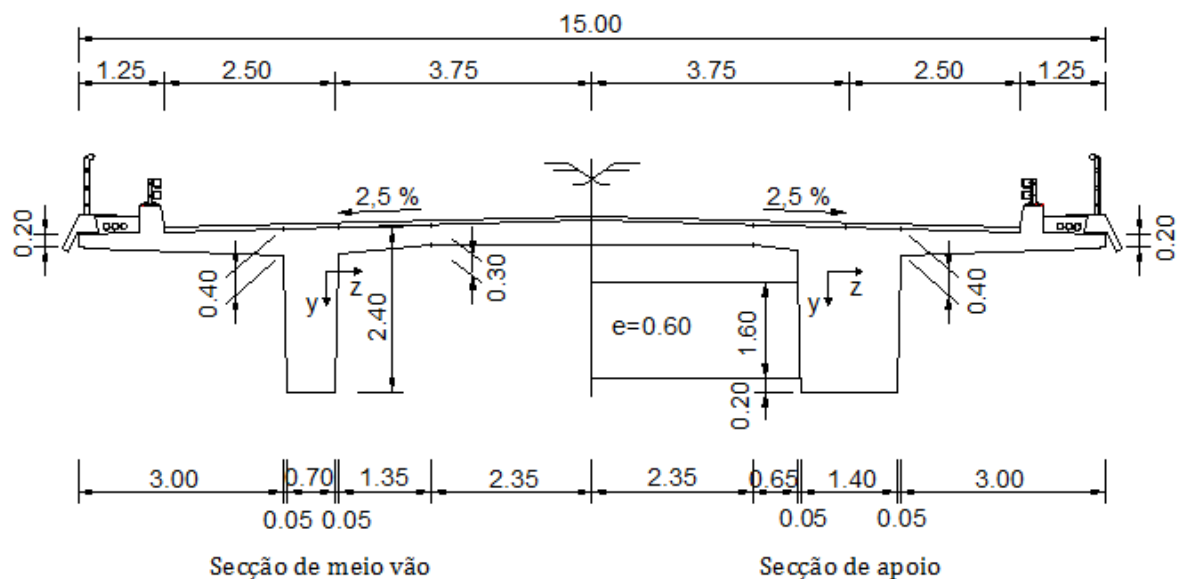


Figura 4.12 – Seção transversal do tabuleiro do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 40,00 m.

4.4.2 Modelos de elementos finitos

Tal como aconteceu no caso de estudo 1, o modelo de elementos finitos utilizado simula as carlingas e as vigas com elementos de barra. A laje da plataforma foi discretizada com elementos de casca. Os elementos de casca consideram a variação de espessura da laje ao longo da secção transversal, tendo 1,00 m de comprimento e 0,50 m de largura.

4.4.2.1 Variante com 25,00 m de vão corrente

Os elementos de barra entre as secções de apoio nos pilares até uma distância de 4,00 m, têm propriedades geométricas variáveis. O modelo é apresentado nas figuras 4.13, 4.14 e 4.15.

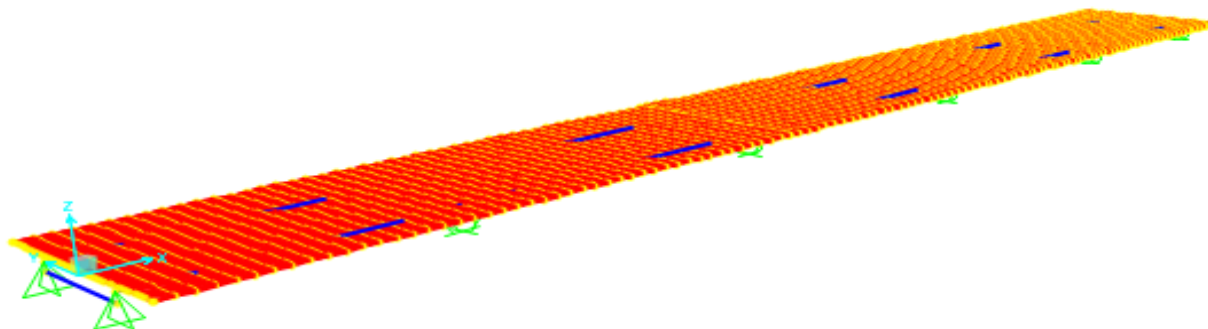


Figura 4.13 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 25,00 m. Perspetiva global.

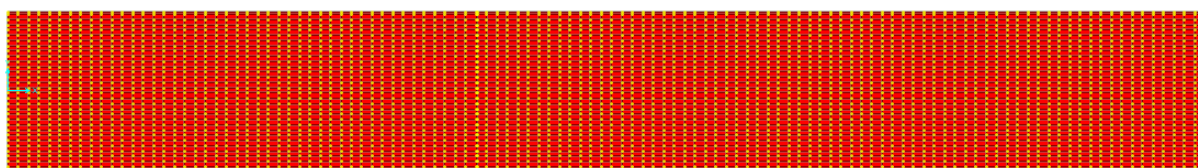


Figura 4.14 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 25,00 m. Vista dos elementos de barra em planta.

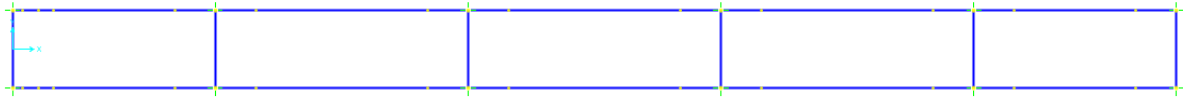


Figura 4.15 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 25,00 m. Vista dos elementos de barra em planta.

Nas tabelas 4.5 e 4.6 apresentam-se as propriedades dos elementos de barra e de casca considerados.

Tabela 4.5 – Propriedades das vigas do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 25,00 m.

Secção	Coordenadas x [m]	A[m ²]	I _{yy} [m ⁴]	I _{zz} [m ⁴]	J [m ⁴]
Viga - Vão	{20, 45, 70, 95}	4,09	10,776	1,117	0,661
Viga - Apoio	{[0,16], [24,41], [49,66], [74,91], [99,115]}	3,57	10,750	0,804	0,281
Carlingas	{0, 20, 45, 70, 95, 115}	0,6	0,018	0,050	0,088

Tabela 4.6 – Propriedades das lajes na secção transversal do caso de estudo 2, na variante com vão correntes de 25,00 m.

Elementos de casca	Largura [m]	Coordenadas y [m]	Espessura [m]
1 (extremidade da consola)	0,25	{[0;0,25];[14,75;15,0]}	0,208
2	0,50	{[0,25;0,75];[14,25;14,75]}	0,233
3	0,50	{[0,75;1,25];[13,75;14,25]}	0,267
4	0,50	{[1,75;2,25];[13,25;13,75]}	0,300
5	0,50	{[2,25;2,75];[12,75;13,25]}	0,333
6	0,50	{[2,75;3,25];[12,25;12,75]}	0,367
7	0,46	{[3,25;3,71];[11,79;12,25]}	0,396
8	0,54	{[3,71;4,25];[11,25;11,79]}	0,400
9	0,50	{[4,25;4,75];[10,75;11,25]}	0,386
10	0,50	{[4,75;5,25];[10,25;10,75]}	0,356
11	0,50	{[5,25;5,75];[9,75;10,25]}	0,312
12 (eixo do tabuleiro)	0,50	{[5,75;9,75]}	0,300

4.4.2.2 Variante com 40,00 m de vão corrente

Na variante com 40,00 m de vão corrente o comprimento da variação linear da largura das vigas passa de 4,00 m para 6,00 m. Não há mais alterações significativas face ao anterior modelo. As figuras 4.16 a 4.18 têm diferentes representações do modelo de cálculo.

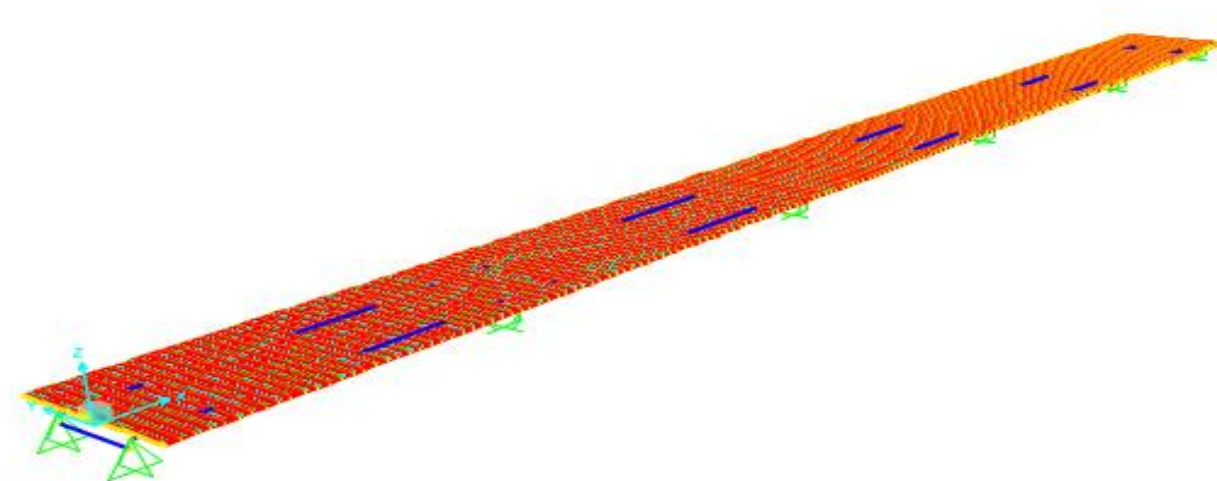


Figura 4.16 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 40,00 m. Perspetiva global.

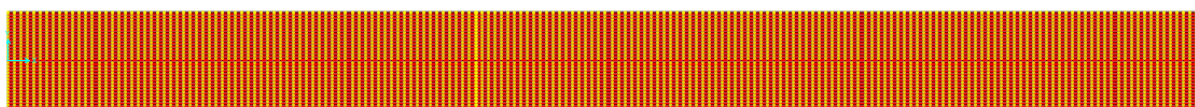


Figura 4.17 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 40,00 m. Vista dos elementos de casca em planta.



Figura 4.18 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 40,00 m. Vista dos elementos de barra em planta.

Nas tabelas 4.7 e 4.8 apresentam-se as propriedades dos elementos de casca e de barra considerados.

Tabela 4.7 – Propriedades das lajes na secção transversal do tabuleiro do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 40,00 m.

Elementos de Casca	Largura [m]	Coordenadas y [m]	Espessura [m]
1 (extremidade da consola)	0,25	{[0;0,25];[14,75;15,0]}	0,208
2	0,50	{[0,25;0,75];[14,25;14,75]}	0,233
3	0,50	{[0,75;1,25];[13,75;14,25]}	0,267
4	0,50	{[1,75;2,25];[13,25;13,75]}	0,300
5	0,50	{[2,25;2,75];[12,75;13,25]}	0,333
6	0,50	{[2,75;3,25];[12,25;12,75]}	0,367
7	0,46	{[3,25;3,71];[11,79;12,25]}	0,396
8	0,54	{[3,71;4,25];[11,25;11,79]}	0,400
9	0,50	{[4,25;4,75];[10,75;11,25]}	0,386
10	0,50	{[4,75;5,25];[10,25;10,75]}	0,356
11	0,50	{[5,25;5,75];[9,75;10,25]}	0,312
12 (eixo do tabuleiro)	0,50	{[5,75;9,75]}	0,300

Tabela 4.8 – Propriedades das vigas do tabuleiro do caso de estudo 2, na variante com vãos correntes de 40,00 m.

Secções	Coordenadas x [m]	A [m ²]	I_{yy} [m ⁴]	I_{zz} [m ⁴]	J [m ⁴]
Vigas - Vão	{32, 72, 112, 152}	5,40	11,058	3,000	1,647
Vigas - Apoio	{[0,26], [38,66], [78,106], [118,146], [158,184]}	3,97	10,86	1,857	0,377
Carlingas	{0, 32, 72, 112, 152, 184}	0,84	0,025	0,137	0,088

4.5 Caso de estudo 3

4.5.1 Caracterização estrutural

O terceiro caso de estudo é constituído por um tabuleiro estreito, com largura de 6,50 m, composto por 3 vigas pré-fabricadas, afastadas de 2,20 m. O tabuleiro tem um passeio de cada lado de 1,25 m de largura, sendo a faixa de rodagem de 4,00 m (Figura 4.19). O tabuleiro tem 2 vãos extremos de 24,00 m e um vão central de 30,00 m. Em cada secção de apoio existe uma carlinga a ligar as 3 vigas, com altura de 1,50 m e largura de 0,60 m. A laje de plataforma tem uma espessura constante de 0,20 m.

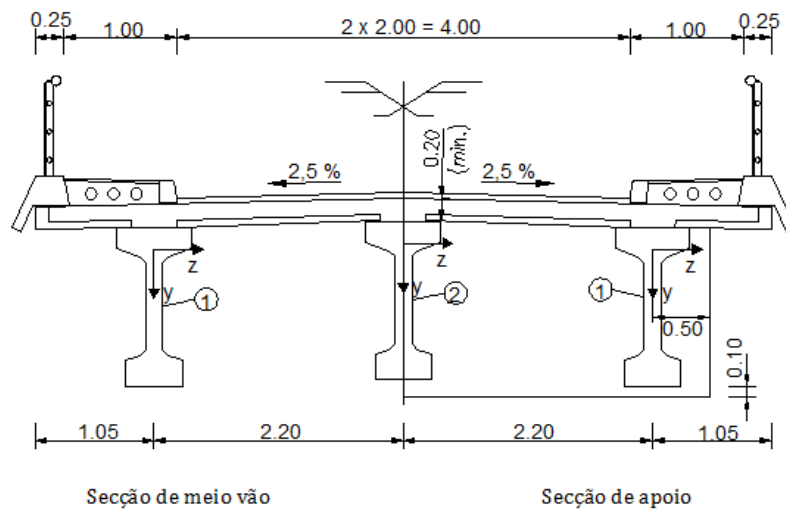


Figura 4.19 – Secção transversal do tabuleiro do caso de estudo 3.

Em termos de análise considerar-se-á que o tabuleiro não tem passeios, assumindo-se uma faixa de rodagem com 6,50 m de largura.

4.5.2 Modelo de elementos finitos

O modelo estrutural é composto por elementos de casca de 1,50 m de comprimento e 0,50 m de largura, sendo a sua altura constante em todo o tabuleiro (0,20 m). O modelo numérico é representado nas figuras 4.20 a 4.22.

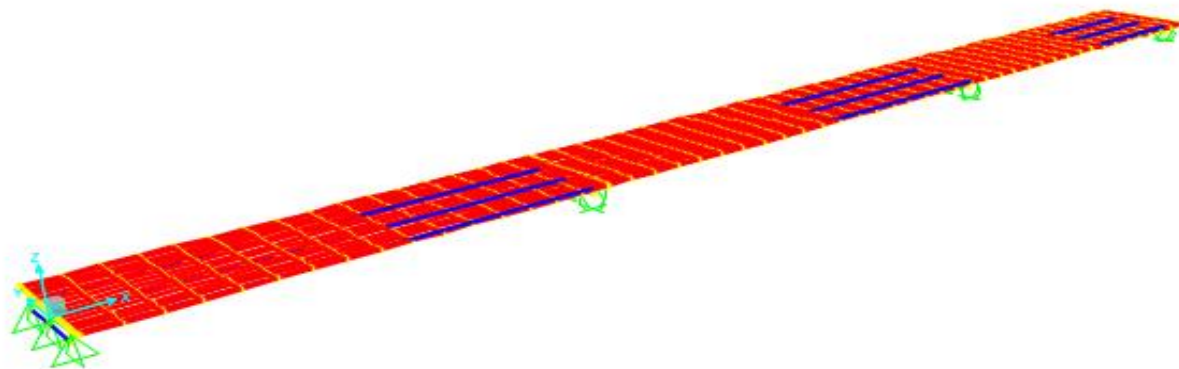


Figura 4.20 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 3. Vista global.



Figura 4.21 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 3. Vista dos elementos de casca em planta.

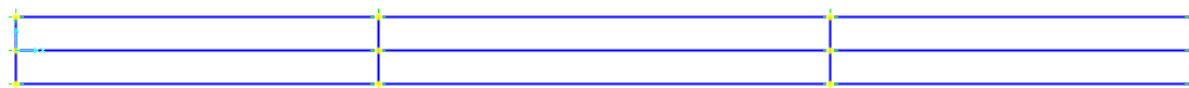


Figura 4.22 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 3. Vista dos elementos de barra em planta.

Na tabela 4.9 apresentam-se as propriedades das barras consideradas no modelo.

Tabela 4.9 – Propriedades das vigas do tabuleiro do caso de estudo 3.

Secções	Coordenadas x [m]	A [m ²]	I _{yy} [m ⁴]	I _{zz} [m ⁴]	J [m ⁴]
Vigas 1	{[0,78]}	0,87	0,178	0,233	0,023
Vigas 2	{[0,78]}	0,87	0,189	0,229	0,023
Carlingas	{0, 24, 54, 78}	1,05	0,032	0,268	0,099

4.6 Caso de estudo 4

4.6.1 Caracterização estrutural

O quarto caso de estudo é constituído por um tabuleiro largo, com largura de 14,00 m, composto por 7 vigas pré-fabricadas, afastadas de 2,00 m. O tabuleiro tem um passeio de cada lado de 1,00 m de largura, sendo a faixa de rodagem de 12,00 m (Figura 4.23). Tal como no caso anterior, o tabuleiro tem 2 vãos extremos de 24,00 m e um vão central de 30,00 m. Em cada secção de apoio existe uma carlinga a ligar as 7 vigas, com altura de 1,50 m e largura de 0,60 m. A laje de plataforma tem uma espessura constante de 0,20 m.

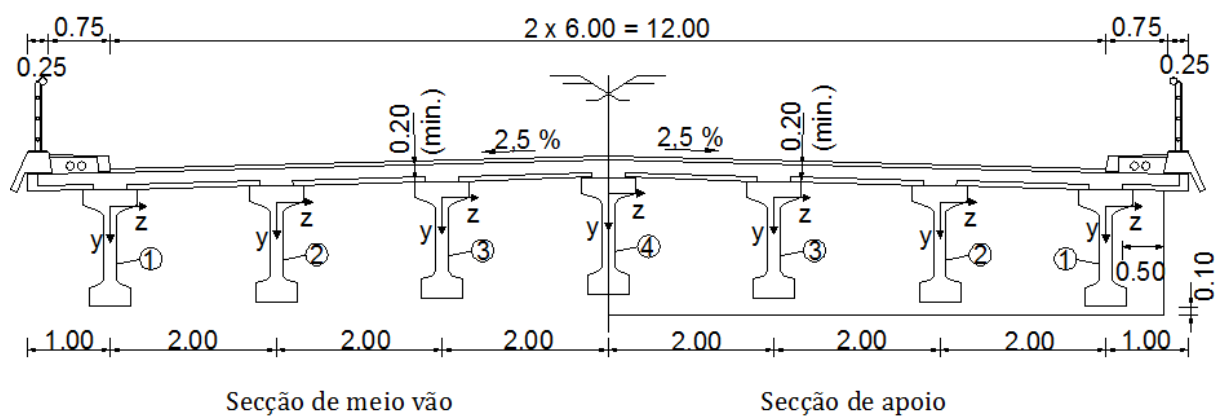


Figura 4.23 – Secção transversal do tabuleiro do caso de estudo 4.

Em termos de análise considerar-se-á que o tabuleiro não tem passeios, assumindo-se uma faixa de rodagem com 14,00 m de largura.

4.6.2 Modelo de elementos finitos

O modelo estrutural é composto por elementos de casca de 1,50 m de comprimento e 0,50 m de largura, sendo a sua altura constante em todo o tabuleiro (0,20 m). O modelo numérico é representado na figura 4.24.

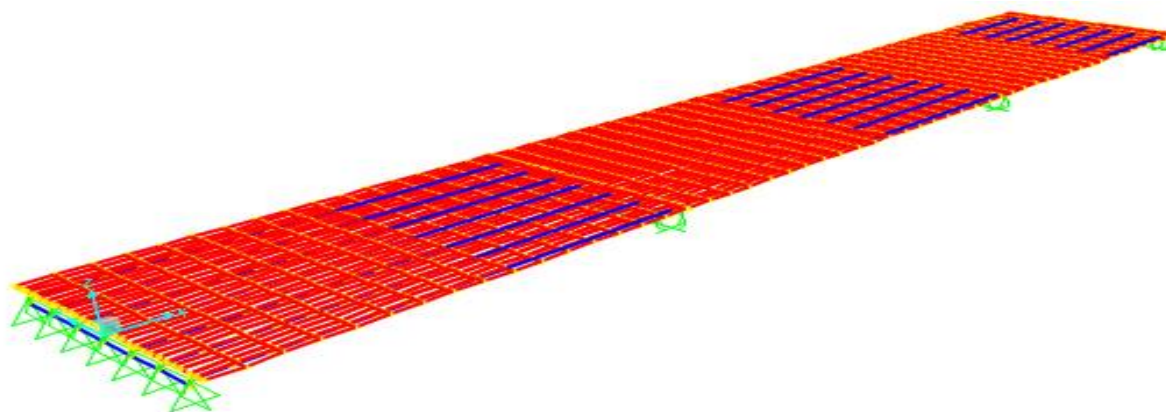


Figura 4.24 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 4. Perspetiva global.

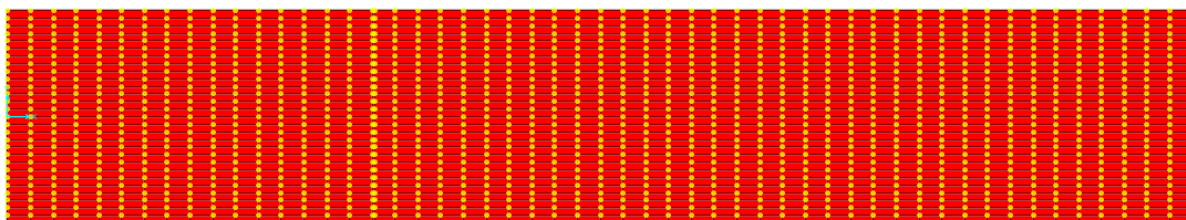


Figura 4.25 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 4. Vista dos elementos de casca em planta.



Figura 4.26 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 4. Vista dos elementos de barra em planta.

Na tabela 4.10 apresentam-se as propriedades das barras consideradas no modelo.

Tabela 4.10 – Propriedades das vigas do tabuleiro do caso de estudo 4

Secções	Coordenadas x [m]	A [m ²]	I _{yy} [m ⁴]	I _{zz} [m ⁴]	J [m ⁴]
Vigas 1	{[0,78]}	0,84	0,146	0,229	0,022
Vigas 2	{[0,78]}	0,84	0,152	0,229	0,022
Vigas 3	{[0,78]}	0,84	0,168	0,229	0,022
Vigas 4	{[0,78]}	0,84	0,189	0,229	0,022
Carlingas	{0, 24, 54, 78}	1,04	0,031	0,257	0,097

4.7 Caso de estudo 5

4.7.1 Caracterização estrutural

O último caso de estudo é constituído por um tabuleiro largo, com largura de 15,00 m, composto por 4 vigas pré-fabricadas com aumento da largura da alma na zona junto às secções de apoio nos pilares, afastadas de 3,60 m. O tabuleiro tem um passeio de cada lado de 1,25 m de largura, sendo a faixa de rodagem de 12,50 m (Figura 4.27). O tabuleiro tem 2 vãos extremos de 24,00 m e três vãos intermédios de 30,00 m. Em cada secção de apoio existe uma carlinga a ligar as 4 vigas, com altura de 1,80 m e largura de 0,60 m. A laje de plataforma tem uma espessura constante de 0,25 m.

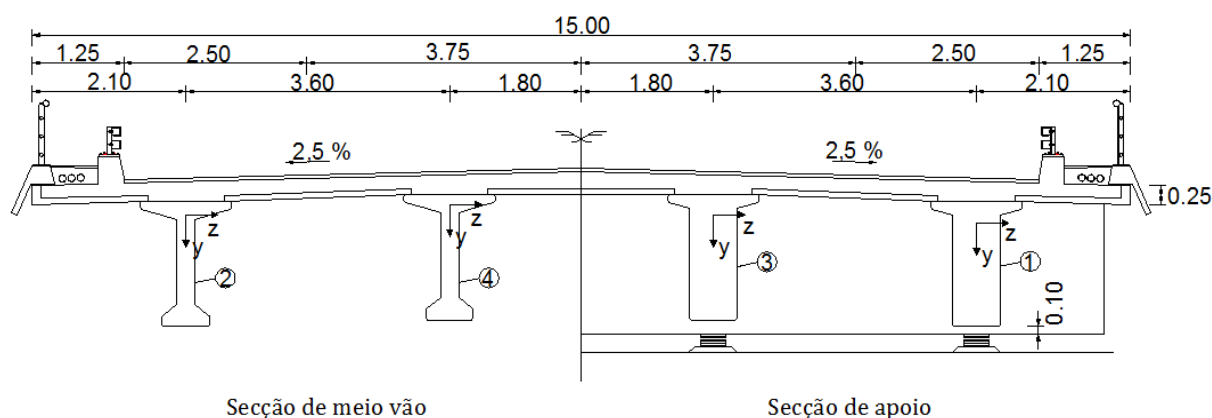


Figura 4.27 – Secção transversal do tabuleiro do caso de estudo 5.

Em termos de análise considerar-se-á que o tabuleiro não tem passeios, assumindo-se uma faixa de rodagem com 15,00 m de largura.

4.7.2 Modelo de elementos finitos

O modelo estrutural é composto por elementos de casca de 1,50 m de comprimento e 0,50 m de largura, sendo a sua altura constante em todo o tabuleiro (0,25 m). O modelo numérico é representado nas figuras 4.28 a 4.30.

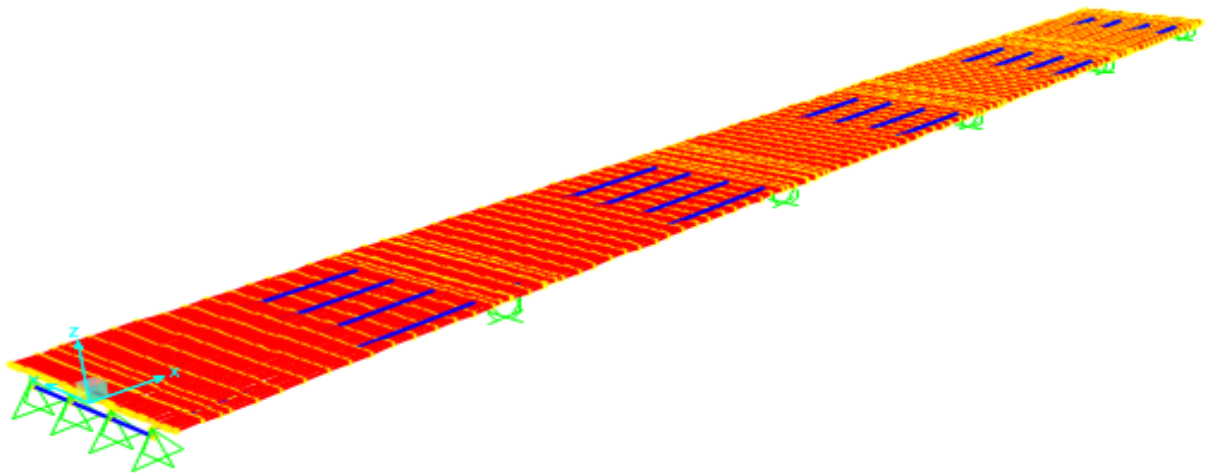


Figura 4.28 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 5. Perspectiva global.

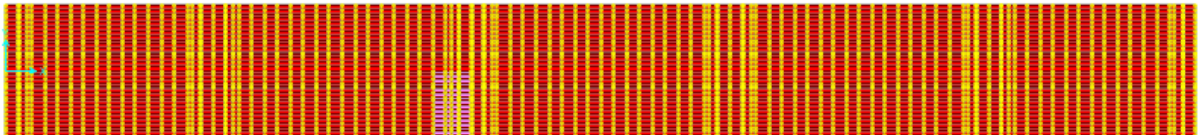


Figura 4.29 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 5. Vista dos elementos de casca em planta.

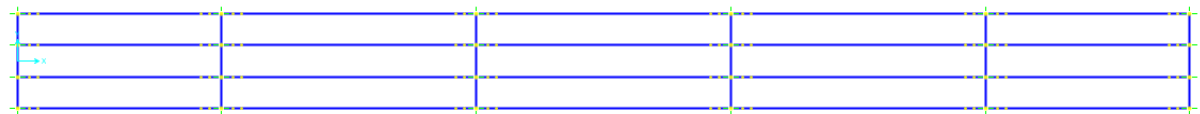


Figura 4.30 – Modelo de elementos finitos do caso de estudo 5. Vista dos elementos de barra em planta.

Na tabela 4.11 apresentam-se as propriedades das barras consideradas no modelo.

Tabela 4.11 – Propriedades das vigas do tabuleiro do caso de estudo 5.

Secções	Coordenadas x [m]	A [m ²]	I _{yy} [m ⁴]	I _{zz} [m ⁴]	J [m ⁴]
Vigas 1 e 3	{[22,6;25,4], [52,6;55,4], [82,6;85,4], [112,6;115,4]}	2,21	1,352	0,790	0,189
Vigas 2 e 4	{[0;21,6], [26,4;51,6], [56,4;83,6], [86,4;111,6], [116,4;138]}	1,71	1,323	0,570	0,064
Carlingas	{0; 24, 54, 84, 114, 138}	1,08	0,205	0,029	0,273

Capítulo 5

Comparação dos efeitos estruturais devidos às sobrecargas

5.1 Introdução

Na sequência do capítulo anterior, em que foram apresentados os casos de estudo a considerar no presente trabalho, apresentam-se os carregamentos e os resultados da análise estrutural, nomeadamente na direção longitudinal e na direção transversal.

Com os modelos de carga definidos nas normas apresentadas no capítulo 3, foram obtidos os esforços máximos nos modelos estruturais dos casos de estudo e, de seguida, procedeu-se à sua comparação tendo como base de referência a norma portuguesa (RSA).

Na direção longitudinal foram analisados os momentos fletores máximos positivo e negativo e os esforços transversos máximos nas vigas, na secção de meio vão e nos apoios nos pilares dos vãos intermédios. Em todos os casos de estudo, as vigas de cada tabuleiro são estruturalmente semelhantes entre si. Por essa razão, na direção longitudinal foram considerados os esforços máximos nas secções referidas, independentemente da viga do tabuleiro. Porém, em certos casos de tabuleiros com várias vigas, os esforços máximos ocorrem em vigas diferentes para normas distintas.

Na direção transversal foram analisados o momento fletor máximo negativo na consola, o momento fletor máximo positivo na laje entre vigas e o momento fletor máximo negativo na laje sobre os apoios nas vigas.

Por último, efetuou-se uma comparação dos resultados obtidos nos modelos elementos finitos com os resultados obtidos com o carregamento de superfícies de influência, de modo a avaliar a adequabilidade deste último método em tabuleiros vigados.

Para além dos esforços devidos às sobrecargas, apresentam-se previamente os esforços devidos ao peso próprio, para comparação da sua ordem de grandeza.

Os esquemas dos carregamentos considerados para a obtenção dos esforços máximos apresentam-se em anexo. No Anexo A1 expõem-se todos os carregamentos condicionantes da análise longitudinal e no Anexo A2 apresentam-se todos os carregamentos condicionantes da análise transversal. Efetuaram-se algumas simplificações na definição dos carregamentos. Assim, quando uma carga pontual tinha o ponto de aplicação no meio de um elemento de casca, essa carga foi dividida nos quatro nós desse elemento. O mesmo raciocínio foi utilizado para as sobrecargas uniformes e lineares.

5.2 Resultados da análise longitudinal

5.2.1 Generalidades

Foi sempre considerada a viga com esforços máximos devidos ao RSA. Em alguns casos, a viga condicionante de outras normas não coincide com a viga condicionante do RSA.

Nos casos de tabuleiros betonados *in-situ* (casos de estudos 1 e 2) não existe uma viga condicionante, pois as duas vigas estão sujeitas a iguais esforços. Nos tabuleiros de vigas pré-fabricadas (casos de estudo 3, 4 e 5), por se ter optado por usar toda a largura do tabuleiro como faixa de rodagem e bermas, a viga condicionante foi diferente para as várias normas.

5.2.2 Caso de estudo 1

5.2.2.1 Variante com 25,00 m de vão corrente

Na tabela 5.1 apresentam-se os esforços máximos obtidos no tabuleiro do caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente, para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.1 – Esforços máximos do para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.

		M- (kNm)	M+ (kNm)	V (kN)
Peso próprio		3369	1404	895
RSA	Sl	371	617	121
	Su	941	608	216
	Sl + Su	1312	1225	337
	VT	1025	1493	550
EC1	LM1 - TS	1138	1821	348
	LM1 - UDL	1164	715	272
	LM1 - TS + UDL	2302	2536	620
	LM2	693	1081	216
AASHTO	Truck	-	1053	204
	Tandem	-	915	163
	Lane Load	565	365	130
	Truck + Lane Load	-	1418	334
	Tandem + Lane Load	-	1280	293
	2 Truck	1553	-	-
	90% de 2 Truck + Lane Load	1906	-	-
SATCC	NA - (1)	1827	1102	419
	NA - (2)	352	576	113
	NA - (3)	364	415	113
	NA - (1) + (2)	2179	1678	532
	NB - 24	1442	1493	506
ABNT	Su + VT	2501	2071	664

Vãos correntes de 25,00 m

Na tabela 5.2 estão indicados os esforços condicionantes de cada norma, assim como a relação com os valores máximos do RSA.

Tabela 5.2 – Esforços máximos para cada norma e sua relação com o RSA, no caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	M- (kNm)	M+ (kNm)	V (kN)	M-	M+	V
RSA	1312	1493	550	1,000	1,000	1,000
EC1	2302	2536	620	1,755	1,699	1,127
AASHTO	1906	1418	334	1,453	0,950	0,607
SATCC	2179	1678	532	1,661	1,124	0,967
ABNT	2501	2071	664	1,906	1,387	1,207

Nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3 representam-se os resultados da tabela 5.2 sob a forma gráfica.

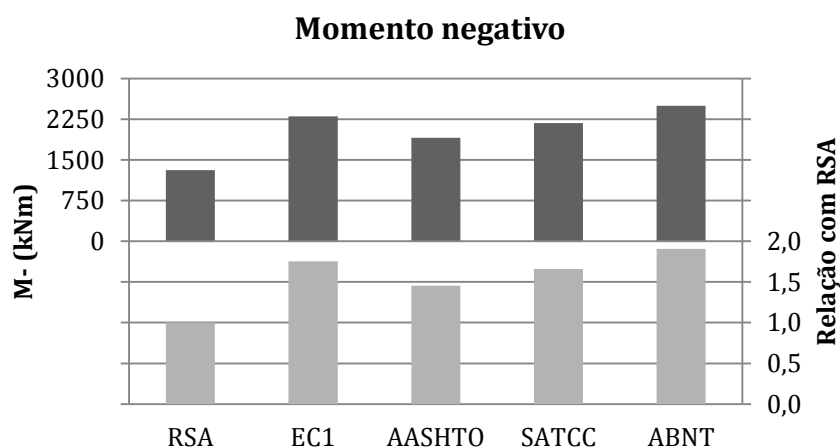


Figura 5.1 – Momentos negativos para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.

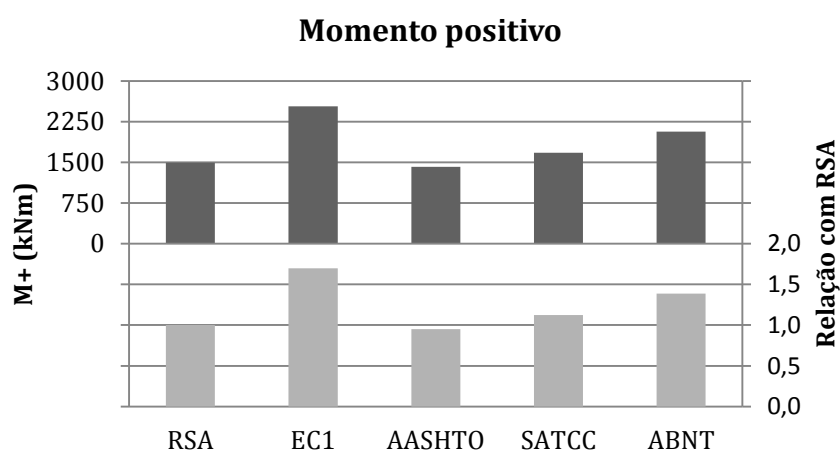


Figura 5.2 – Momentos positivos para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.

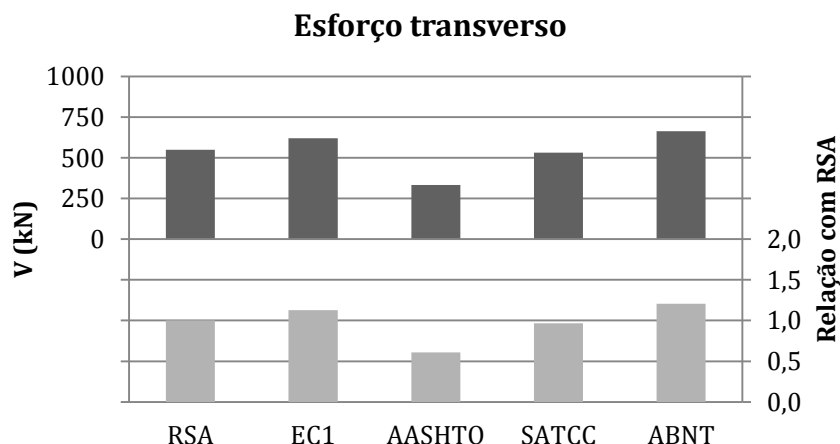


Figura 5.3 – Esforços transversos para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.

A norma europeia é a mais gravosa para os momentos positivos. Para os esforços transversos e momentos negativos, o EC1 deixa de ser o mais gravoso, passando a norma brasileira a ser a mais desfavorável.

Os momentos fletores das restantes normas são maiores que no RSA, exceto o momento positivo a meio vão pela norma norte-americana, que é 5% inferior ao do regulamento português. Por outro lado, para o momento negativo, a AASHTO apresenta um valor 45,3% superior ao do RSA.

Os valores indicados na tabela 5.1 levam a concluir que as sobrecargas pontuais influenciam mais o momento fletor positivo para vãos curtos e tabuleiros estreitos. Por essa razão o EC1 é a norma que mais influencia este efeito estrutural.

A SATCC, caracterizada por um sistema de sobrecargas pontuais menos intensas, perde preponderância no momento positivo em relação ao RSA (12,4%). No entanto, para o momento negativo, é mais condicionante, pois o seu sistema de sobrecarga linear longitudinal provoca um efeito estrutural considerável, fazendo com que o momento negativo aumente significativamente em relação ao do RSA (66,1%).

Os resultados obtidos permitem constatar que o esforço transverso máximo é mais influenciado pelo valor característico das sobrecargas do que pelo formato dos modelos de sobrecargas. Por essa razão, a sequência das normas mais gravosas segue a ordem de intensidades de cada modelo, sendo a ABNT a mais desfavorável, seguida do EC1, do RSA, da SATCC e por último a AASHTO, a norma que menos condiciona o esforço transverso.

5.2.2.2 Variante com 40,00 m de vão corrente

Na tabela 5.3 apresentam-se os esforços máximos obtidos no tabuleiro do caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente, para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.3 – Esforços máximos para caso o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.

		M- (kNm)	M+ (kNm)	V (kN)
Peso próprio		9725	4095	1673
RSA	Sl	587	1033	122
	Su	2389	1553	355
	Sl + Su	2976	2586	477
	VT	1542	2395	572
EC1	LM1 - TS	1697	2815	351
	LM1 - UDL	2876	1765	439
	LM1 - TS + UDL	4573	4580	790
	LM2	1033	1718	205
AASHTO	Truck	-	1884	235
	Tandem	-	1494	178
	Lane Load	1434	932	213
	Truck + Lane Load	-	2816	448
	Tandem + Lane Load	-	2426	391
	2 Truck	2341	-	-
	90% de 2 Truck + Lane Load	3398	-	-
SATCC	NA - (1)	3964	3276	589
	NA - (2)	546	949	112
	NA - (3)	546	905	108
	NA - (1) + (2)	4510	4225	701
	NB - 24	2235	2772	575
ABNT	Su + VT	5410	4331	904

Diagrama de uma ponte com um único vão de 40,00 m. O tabuleiro tem uma largura total de 11,00 m e uma largura de faixa de rodagem e bermas de 8,00 m. A altura da estrutura é de 2,40 m. O vão é rotulado como "Vão corrente de 40,00 m".

Na tabela 5.4 estão indicados dos esforços condicionantes de cada norma, assim como a relação com os valores máximos do RSA.

Tabela 5.4 – Esforços máximos para cada norma e sua relação com o RSA, no caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	M- (kNm)	M+ (kNm)	V (kN)	M-	M+	V
RSA	2976	2586	572	1,000	1,000	1,000
EC1	4573	4580	790	1,537	1,771	1,381
AASHTO	3398	2816	448	1,142	1,089	0,783
SATCC	4510	4225	701	1,515	1,634	1,226
ABNT	5410	4331	904	1,818	1,675	1,580

Nas figuras 5.4, 5.5 e 5.6 representam-se os resultados da tabela 5.4 sob a forma gráfica.

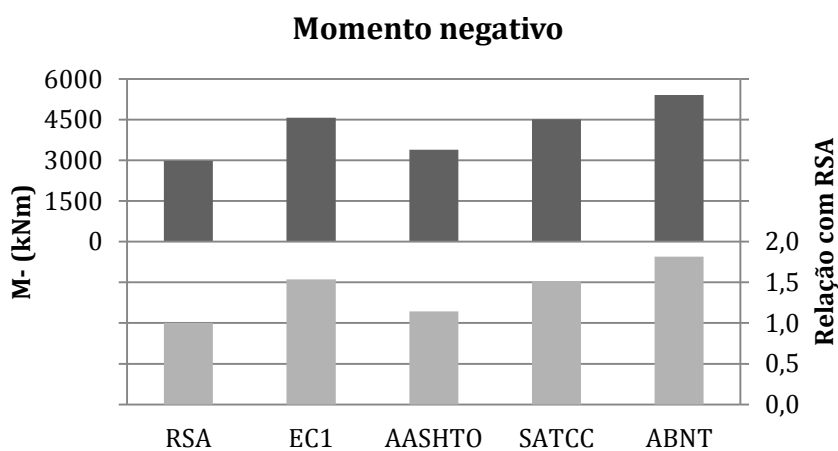


Figura 5.4 – Momentos negativos para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.

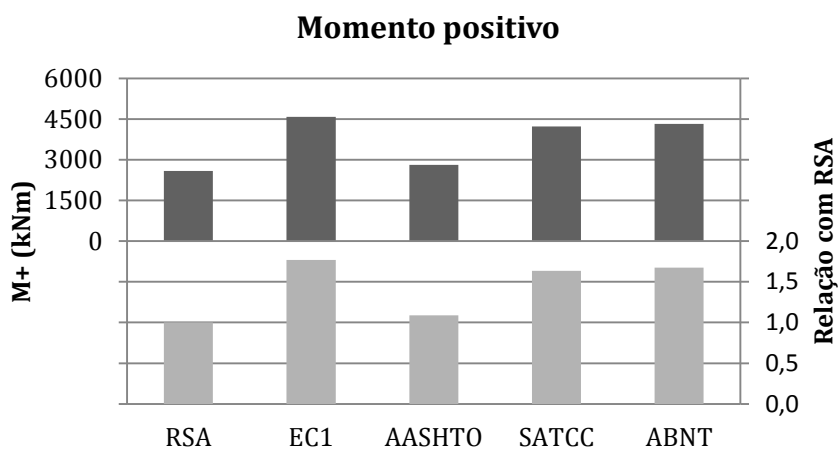


Figura 5.5 – Momentos positivos para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.

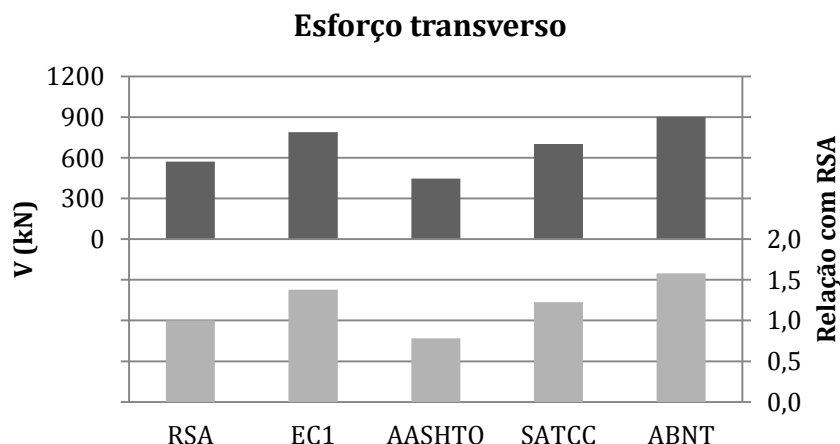


Figura 5.6 – Esforços transversos para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.

A norma mais gravosa, para o momento negativo e o esforço transverso, é a brasileira. Contudo, para o momento positivo, é 6% inferior ao do EC1. Relativamente ao caso de estudo anterior, verifica-se que a ABNT é ainda mais condicionante que o RSA, tal como seria de esperar, pois o vão corrente aumenta 15,00 m.

A SATCC e a AASHTO são mais desfavoráveis que o RSA em todos os efeitos estudados, à exceção do esforço transverso da norma norte-americana. É de salientar que a norma norte-americana é novamente a menos gravosa de entre as normas estrangeiras consideradas. Apesar de ser a norma menos gravosa, aumentou percentualmente o momento fletor máximo positivo e o esforço transverso máximo em relação ao RSA. Porém, o momento negativo diminuiu em relação ao RSA, sendo neste caso 14,2% mais gravoso.

A norma brasileira, por ter o maior valor característico de sobrecarga uniforme, causa o maior momento negativo. O EC1 e a SATCC, dada a maior intensidade dos seus sistemas de cargas concentradas, condicionam mais o momento positivo.

Verifica-se também que o esforço transverso é mais influenciado pela intensidade das cargas do que pelos seus formatos, ficando justificada a sequência das normas mais gravosas que segue, em geral, a ordem das intensidades dos sistemas de sobrecargas.

Deve notar-se que, com o aumento do vão, verifica-se uma perda de preponderância das cargas pontuais. Desta forma fica justificada a alteração na relação dos efeitos entre a norma norte-americana e o RSA, da variante com 25,00 m de vão para a variante de 40,00 m de vão. Efetivamente, as sobrecargas uniforme e linear passaram a ser o modelo condicionante do regulamento português para o momento positivo.

5.2.3 Caso de estudo 2

5.2.3.1 Variante com 25,00 m de vão corrente

Na tabela 5.5 constam os esforços máximos obtidos no tabuleiro do caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente, para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.5 – Esforços máximos para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.

		M- (kNm)	M+ (kNm)	V (kN)
Peso próprio		4487	1897	1135
RSA	Sl	590	972	186
	Su	1496	975	328
	Sl + Su	2086	1947	514
	VT	1165	1699	554
EC1	LM1 - TS	1622	2574	479
	LM1 - UDL	1611	1011	356
	LM1 - TS + UDL	3233	3585	835
	LM2	787	1227	241
AASHTO	Truck	-	1309	261
	Tandem	-	1149	207
	Lane Load	860	561	189
	Truck + Lane Load	-	1870	450
	Tandem + Lane Load	-	1710	396
	2 Truck	1800	-	-
	90% de 2 Truck + Lane Load	2394	-	-
SATCC	NA - (1)	2244	1874	537
	NA - (2)	453	736	82
	NA - (3)	405	611	123
	NA - (1) + (2)	2697	2610	619
	NB - 36	2570	2722	841
ABNT	Su + VT	3690	2775	1087

15,00
12,50
Faixa de rodagem e bermas
1,80
Vão corrente de 25,00 m

Na tabela 5.6 apresentam-se os esforços condicionantes de cada norma, assim como a relação com os valores máximos do RSA.

Tabela 5.6 – Esforços máximos para cada norma e sua relação com o RSA, no caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	M- (kNm)	M+ (kNm)	V (kN)	M-	M+	V
RSA	2086	1947	554	1,000	1,000	1,000
EC1	3233	3585	835	1,550	1,841	1,507
AASHTO	2394	1870	450	1,148	0,960	0,812
SATCC	2697	2722	841	1,293	1,398	1,518
ABNT	3690	2775	1087	1,769	1,425	1,962

As figuras 5.7, 5.8 e 5.9 representam, sob a forma gráfica, os resultados indicados na tabela 5.6.

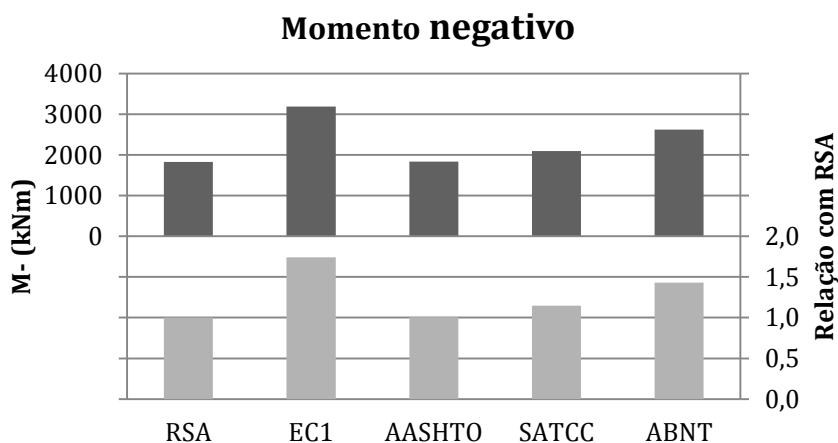


Figura 5.7 – Momentos negativos para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.

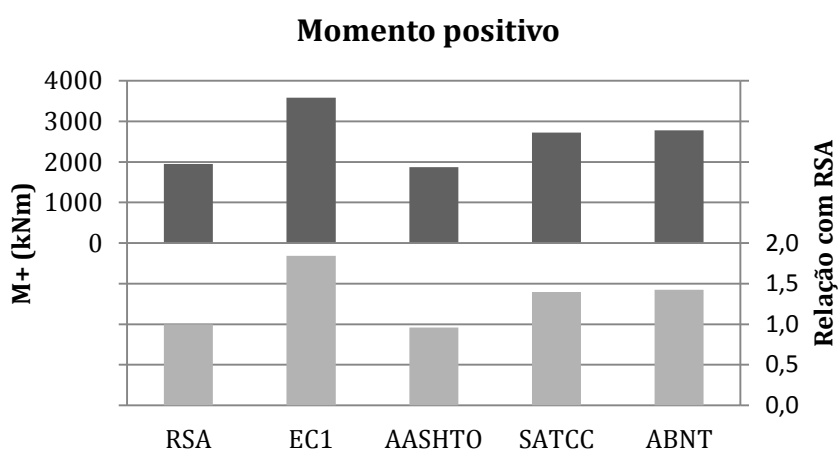


Figura 5.8 – Momentos positivos para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.

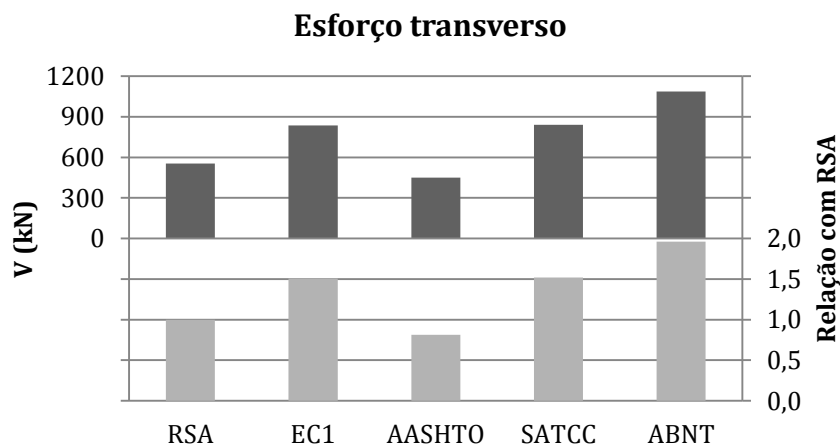


Figura 5.9 – Esforços transversos para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.

Tal como no caso de estudo anterior, a norma brasileira condiciona o momento negativo e o esforço transverso, enquanto o momento positivo é mais desfavorável para o EC1. Para este esforço verifica-se que existem maiores diferenças percentuais entre os resultados das cinco normas.

A norma norte-americana gera esforços muito próximos dos do RSA, enquanto que a norma sul-africana apresenta valores mais próximos do EC1 e da ABNT.

O EC1 é a norma que condiciona o momento positivo. Como já foi referido no caso de estudo anterior, esta predominância em relação às restantes normas (com um valor cerca de 30% superior ao da segunda norma mais gravosa) deve-se essencialmente à constituição do seu modelo de sobrecarga, que é mais penalizante para vãos curtos.

Relativamente ao momento negativo, o RSA é a norma menos condicionante, seguida da norma norte-americana (14,8% mais gravosa) e da norma sul-africana (29,3% mais gravosa). Apesar do modelo de cargas para o momento negativo da norma norte-americana parecer ser demasiado conservativo, isso não se confirma, sendo um dos menos condicionantes.

O esforço transverso, como referido anteriormente, é mais influenciado pela intensidade das cargas do que pelo formato do modelo, o que justifica o facto da ABNT ser a norma condicionante para este efeito, dada a maior intensidade da sobrecarga uniforme e do veículo.

O aumento da largura do tabuleiro faz crescer a diferença percentual do esforço transverso entre o RSA e as restantes normas. Na tabela 5.5 verifica-se que o veículo tipo continua a ser o modelo de sobrecarga condicionante do regulamento português, para este esforço. Desta forma conclui-se que, com o alargamento do tabuleiro, as sobrecargas uniformes tornaram-se mais relevantes para os valores finais dos esforços e o RSA, por o seu modelo mais desfavorável ser constituído por cargas concentradas, distancia-se, em termos de esforços, das restantes normas. É ainda de salientar que o momento negativo gerado pela AASHTO diminui a sua diferença percentual para o RSA relativamente ao caso anterior, facto que poderá ser justificado pelo fator de múltipla presença.

5.2.3.2 Variante com 40,00 m de vão corrente

Na tabela 5.7 indicam-se os esforços máximos obtidos no tabuleiro do caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente, para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.7 – Esforços máximos para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.

		M- (kNm)	M+ (kNm)	V (kN)
Peso próprio		13255	5334	2164
RSA	Sl	968	1619	189
	Su	3936	2477	549
	Sl + Su	4904	4096	738
	VT	1859	2734	586
EC1	LM1 - TS	4174	2543	593
	LM1 - UDL	2592	4075	478
	LM1 - TS + UDL	6766	6618	1071
	LM2	1614	2684	320
AASHTO	Truck	-	2424	334
	Tandem	-	1894	217
	Lane Load	2263	1425	316
	Truck + Lane Load	-	3849	650
	Tandem + Lane Load	-	3319	533
	2 Truck	3252	-	-
	90% de 2 Truck + Lane Load	4964	-	-
SATCC	NA - (1)	5073	4013	708
	NA - (2)	734	1214	141
	NA - (3)	643	976	120
	NA - (1) + (2)	5807	5227	849
	NB - 36	4173	4741	946
ABNT	Su + VT	7730	5916	1157

Diagrama de uma viga de concreto armado com dois apoios. A largura total da viga é de 15,00 m. A distância entre os apoios é de 12,50 m. A altura da viga é de 2,40 m. A faixa de rodagem e bemas é indicada no topo da viga. O vão corrente é de 40,00 m.

Na tabela 5.8 apresentam-se os esforços condicionantes de cada norma, assim como a relação com os valores máximos do RSA.

Tabela 5.8 – Esforços máximos para cada norma e sua relação com o RSA, no caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	M- (kNm)	M+ (kNm)	V (kN)	M-	M+	V
RSA	4904	4096	738	1,000	1,000	1,000
EC1	6766	6618	1071	1,380	1,616	1,451
AASHTO	4964	3849	650	1,012	0,940	0,881
SATCC	5807	5227	946	1,184	1,276	1,282
ABNT	7730	5916	1157	1,576	1,444	1,568

Nas figuras 5.10, 5.11 e 5.12 encontram-se representados, sob forma gráfica, os valores da tabela 5.8.

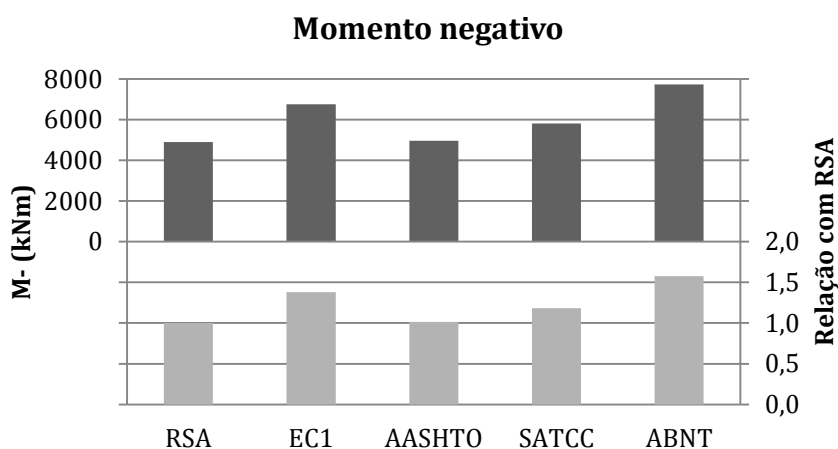


Figura 5.10 – Momentos negativos para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.

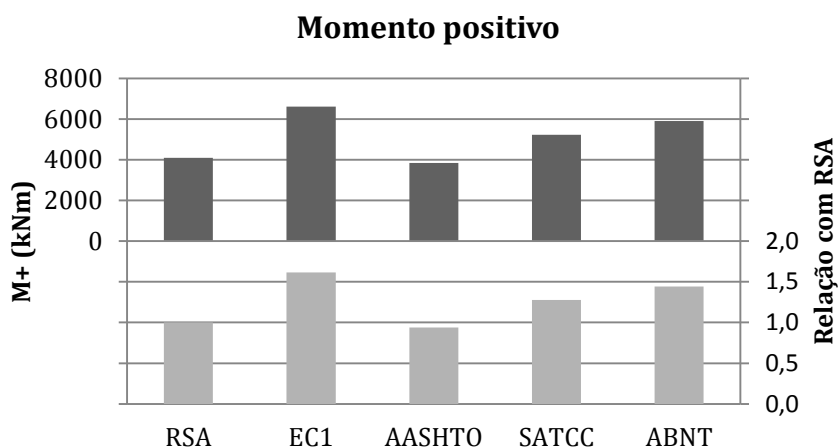


Figura 5.11 – Momentos positivos para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.

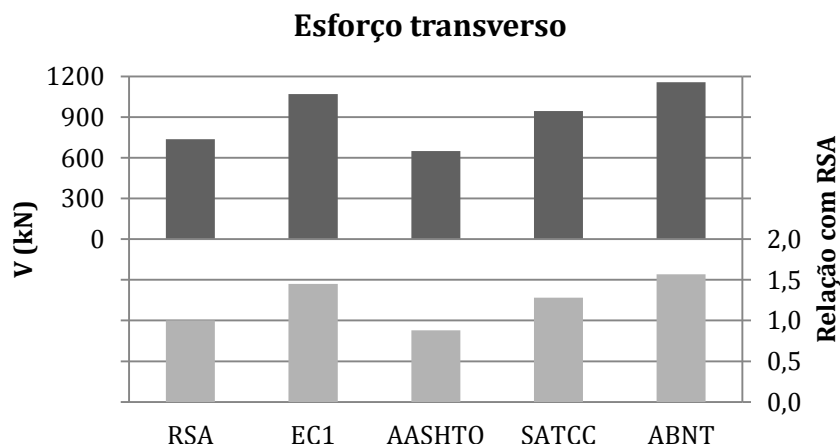


Figura 5.12 – Esforços transversos para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.

Novamente é a norma brasileira que condiciona o momento negativo e o esforço transverso, sendo o momento positivo condicionado pelo EC1. Porém, apesar das restantes normas seguirem a tendência constatada nas anteriores situações, verifica-se que a diferença percentual entre o RSA e as restantes normas, de uma forma geral, diminui.

Para o momento positivo, o valor do EC1 é 61,6% maior que o do RSA. Esta diferença percentual é justificada pela liberdade inerente ao formato dos modelos de sobrecarga do EC1, que permite distribuir as cargas de maneira a serem muito mais condicionantes para a estrutura. Nas restantes normas verifica-se a perda de relevância com o aumento de vão, continuando a hierarquia entre elas.

No momento negativo realça-se que o RSA encurta a diferença para o EC1, aproximadamente 20%, o que indica que as sobrecargas uniforme e linear se tornam preponderantes com o aumento do vão. Esse aumento do momento negativo gerado pelo RSA é tão significativo que o esforço produzido pela AASHTO é apenas 1,2% maior que o do RSA. Prevê-se que com o aumento do vão o RSA passará a ser mais condicionante que a norma norte-americana, para o momento negativo.

A sequência das normas mais desfavoráveis, para o momento negativo, é igual à das situações anteriormente estudadas, com o EC1 e a ABNT a serem 38% e 57,6%, respetivamente, mais gravosos do que o RSA, e as normas norte-americana e sul-africana a apresentarem valores idênticos aos do RSA.

Para o esforço transverso máximo, a diferença percentual entre as diversas normas e o RSA não diminui tanto como nos momentos fletores, apesar da ordem se manter.

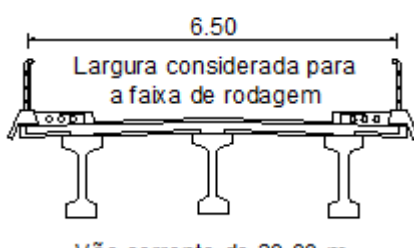
O alargamento do tabuleiro veio confirmar o que se tinha concluído anteriormente, ou seja, com o aumento da largura e do vão do tabuleiro as forças pontuais perdem relevância e os valores dos esforços são mais influenciados pelas sobrecargas uniformes. Assim, as normas europeia e sul-africana condicionam mais o momento positivo e as normas brasileira e norte-americana são mais desfavoráveis para o momento negativo, apesar da norma norte-americana perder alguma relevância com o aumento das dimensões do tabuleiro e do vão.

5.2.4 Caso de estudo 3

Na tabela 5.9 indicam-se os esforços máximos obtidos nas vigas do tabuleiro do caso de estudo 3 para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.9 – Esforços máximos para o caso de estudo 3.

		M- (kNm)	M+ (kNm)	V (kN)
Peso próprio		1398	720	317
RSA	Sl	245	466	48
	Su	617	464	90
	Sl + Su	862	930	138
	VT	1551	1625	353
EC1	LM1 - TS	866	1416	181
	LM1 - UDL	889	626	137
	LM1 - TS + UDL	1755	2042	318
	LM2	660	1215	112
AASHTO	Truck	-	1165	199
	Tandem	-	941	139
	Lane Load	451	345	97
	Truck + Lane Load	-	1510	296
	Tandem + Lane Load	-	1286	236
	2 Truck	1316	-	-
	90% de 2 Truck + Lane Load	1591	-	-
SATCC	NA - (1)	1572	1068	341
	NA - (2)	217	404	40
	NA - (3)	404	645	99
	NA - (1) + (2)	1789	1472	381
	NB - 24	1092	1378	212
ABNT	Su + VT	1576	1651	394



6.50

Largura considerada para a faixa de rodagem

Vão corrente de 30,00 m

Na tabela 5.10 constam os esforços condicionantes de cada norma, assim como a relação com os valores máximos do RSA.

Tabela 5.10 – Esforços máximos para cada norma e sua relação com o RSA, no caso de estudo 3.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	M- (kNm)	M+ (kNm)	V (kN)	M-	M+	V
RSA	1551	1625	353	1,000	1,000	1,000
EC1	1755	2042	318	1,132	1,257	0,901
AASHTO	1591	1510	296	1,026	0,929	0,839
SATCC	1789	1472	381	1,153	0,906	1,079
ABNT	1576	1651	394	1,016	1,016	1,116

Os resultados da tabela 5.10 representam-se, sob a forma gráfica, nas figuras 5.13, 5.14 e 5.15.

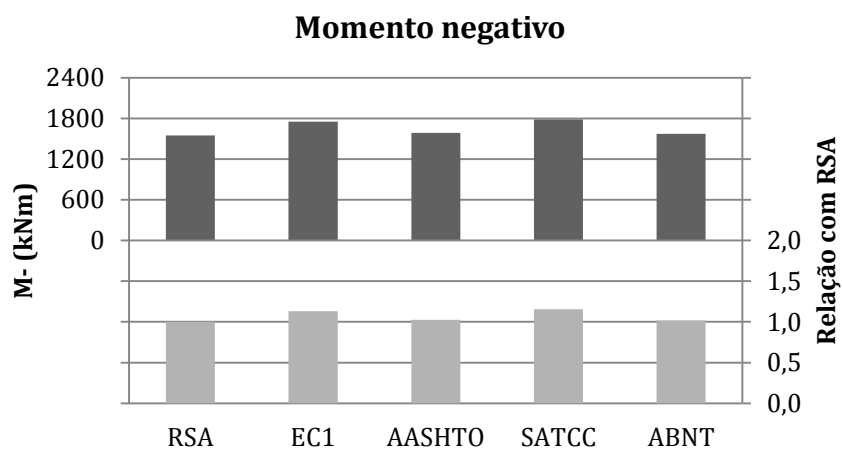


Figura 5.13 – Momentos negativos para o caso de estudo 3.

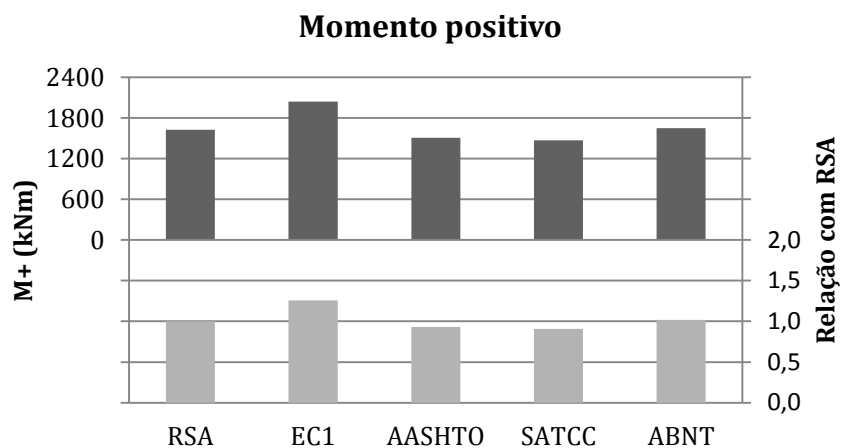


Figura 5.14 – Momentos positivos para o caso de estudo 3.

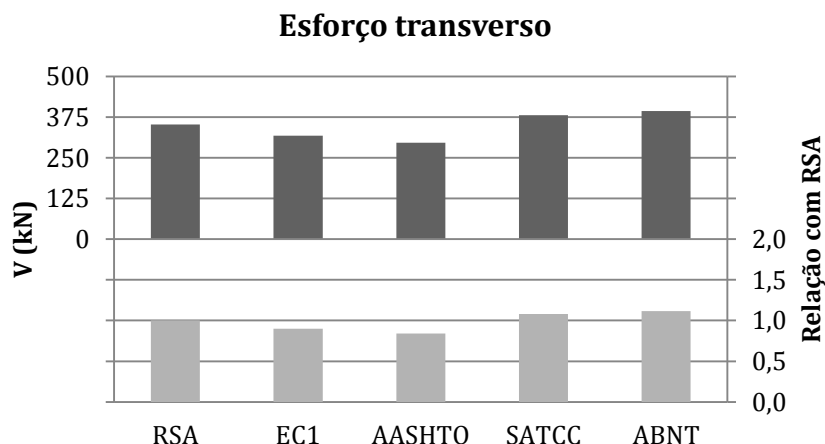


Figura 5.15 – Esforços transversos para o caso de estudo 3.

Este caso de estudo tem um tabuleiro de 6,50 m de largura, constituído por três vigas pré-fabricadas. De forma a condicionar mais a viga exterior, não se considerou a existência do passeio, pelo que os modelos de sobrecargas foram considerados até à extremidade do tabuleiro. Este aspeto provocou uma alteração da relação de esforços entre as normas.

Verificou-se que a norma mais condicionante para o momento positivo é o EC1, para o momento negativo é a SATCC e para o esforço transverso é a ABNT.

Começando pela análise do momento positivo, a norma mais gravosa é o EC1 (25,7% maior que o RSA), seguida de três normas que geram valores da mesma ordem de grandeza, surgindo a SATCC como a norma menos condicionante. É de salientar que o *Tandem System* do EC1 tem grande preponderância no valor do momento positivo final, assim como o veículo tipo do RSA. Este facto justifica a importância das forças concentradas neste caso de estudo. A norma norte-americana impede a mobilização das cargas de forma a condicionar a viga exterior, pelo que a viga mais esforçada é a intermédia, que ainda assim tem uma relação percentual com o RSA de 92,9%.

Para o momento negativo, as cargas pontuais perdem relevância e a SATCC torna-se a norma mais desfavorável. Neste esforço, as 5 normas diferenciam-se apenas 15,3% entre si.

No caso do esforço transverso, o veículo tipo do RSA condiciona muito este esforço, surgindo a AASHTO e o EC1 com os menores valores em relação ao RSA. O regulamento português gera um esforço transverso menor que a SATCC e a ABNT. Contudo verifica-se que as 5 normas apresentam valores muito próximos entre si, sendo a diferença percentual entre os valores extremos apenas de 23,9%.

Tendo em conta a opção tomada de não considerar o passeio, a norma brasileira perde preponderância em relação às restantes normas. Isto deve-se ao facto da ABNT considerar as sobrecargas rodoviárias no passeio, algo que as restantes normas não consideram. Como não existe passeio neste caso de estudo e nos próximos, esta norma irá perder importância.

5.2.5 Caso de estudo 4

Na tabela 5.11 constam os esforços máximos obtidos nas vigas do caso de estudo 4 para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.11 – Esforços máximos para o caso de estudo 4.

		M- (kNm)	M+ (kNm)	V (kN)
Peso próprio		1372	706	311
RSA	Sl	228	49	35
	Su	577	442	69
	Sl + Su	805	491	104
	VT	982	1398	209
EC1	LM1 - TS	736	1201	119
	LM1 - UDL	821	571	103
	LM1 - TS + UDL	1557	1772	222
	LM2	660	1043	89
AASHTO	Truck	-	933	120
	Tandem	-	785	96
	Lane Load	293	225	63
	Truck + Lane Load	-	1158	183
	Tandem + Lane Load	-	1010	159
	2 Truck	918	-	-
	90% de 2 Truck + Lane Load	1090	-	-
SATCC	NA - (1)	751	710	181
	NA - (2)	328	344	50
	NA - (3)	594	615	109
	NA - (1) + (2)	1079	1054	231
	NB - 36	1094	1235	248
ABNT	Su + VT	1462	1522	269

14,00

Largura considerada para a faixa de rodagem

Vão corrente de 30,00 m

Na tabela 5.12 indicam-se os esforços condicionantes de cada norma, assim como a relação com os valores máximos do RSA.

Tabela 5.12 – Esforços máximos para cada norma e sua relação com o RSA, no caso de estudo 4.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	M- (kNm)	M+ (kNm)	V (kN)	M-	M+	V
RSA	982	1398	209	1,000	1,000	1,000
EC1	1557	1772	222	1,586	1,268	1,062
AASHTO	1090	1158	183	1,110	0,829	0,876
SATCC	1094	1235	248	1,114	0,883	1,187
ABNT	1462	1522	269	1,489	1,089	1,287

Nas figuras 5.16, 5.17 e 5.18 representam-se os resultados da tabela 5.12 sob a forma gráfica.

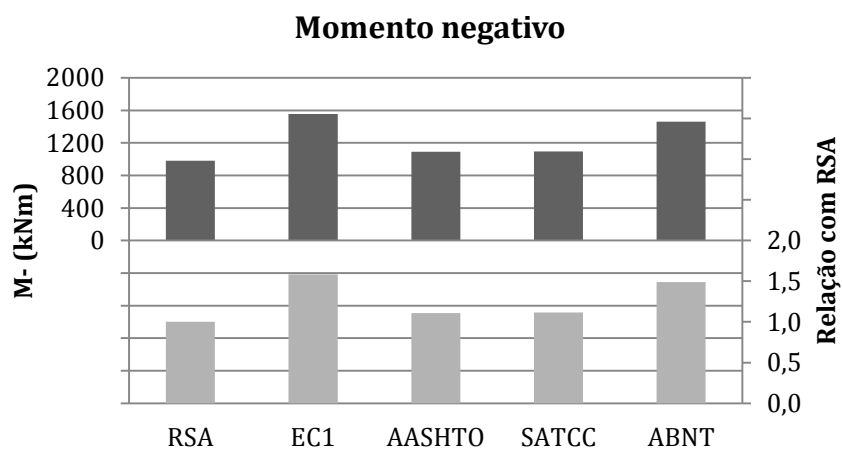


Figura 5.16 – Momentos negativos para o caso de estudo 4.

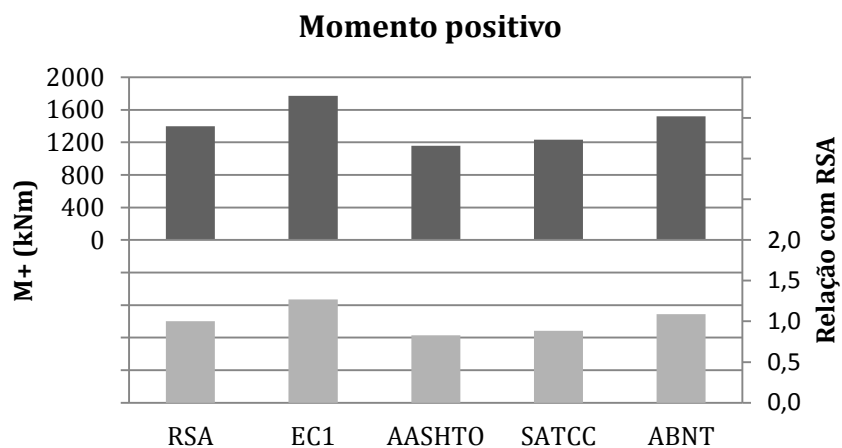


Figura 5.17 – Momentos positivos para o caso de estudo 4.

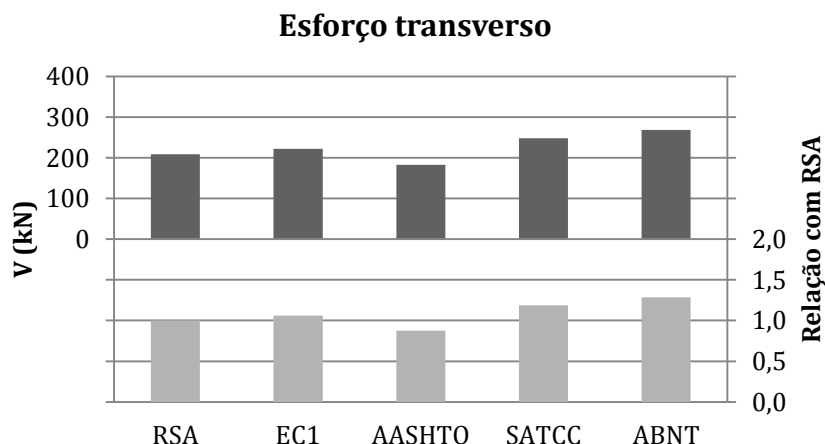


Figura 5.18 – Esforços transversos para o caso de estudo 4.

A norma mais condicionante, no que diz respeito aos momentos fletores, é a europeia, passando a norma brasileira a ser a norma mais desfavoráveis para o esforço transverso.

Começando pela análise do momento fletor positivo, verifica-se que as normas com modelos de sobrecargas concentradas são mais gravosas, exceto a AASHTO, devido à aplicação do fator de múltipla presença e por não considerar um sistema de cargas móveis na análise longitudinal. Assim, o EC1 é o mais gravoso (26,8% maior do que o RSA), seguido da ABNT (8,9% mais gravosa do que RSA). O regulamento português é o terceiro mais desfavorável e a SATCC e a AASHTO são as menos condicionantes.

Para o momento negativo, o RSA perde preponderância visto que o veículo tipo continua a ser o modelo condicionante do regulamento. O EC1 é 58,5% mais gravoso, seguido da ABNT (48,8% maior que o RSA). A terceira norma mais condicionante é a sul-africana, que gera um momento negativo idêntico ao da norma norte-americana.

No caso do esforço transverso, dada a pequena largura de influência das vigas, os resultados são mais próximos. Efetivamente, a diferença percentual, em relação ao RSA, entre a norma menos desfavorável (AASHTO) e a mais gravosa (ABNT) é de 28,5 %.

Tendo em conta o caso de estudo anterior, verifica-se que as cargas concentradas continuam a ter grande influência nos valores dos esforços finais, assim como a mobilidade de aplicação dos modelos de sobrecargas. Apesar do tabuleiro analisado ser mais largo que no caso anterior, a geometria e espaçamento das vigas é semelhante, o que faz com que se mantenha a preponderância das cargas pontuais. Neste caso, o fator de múltipla presença diminui a intensidade das cargas concentradas da AASHTO, influenciando esta em relação às restantes normas.

5.2.6 Caso de estudo 5

Na tabela 5.13 indicam-se os esforços máximos obtidos nas vigas do tabuleiro do caso de estudo 5 para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.13 – Esforços máximos do caso de estudo 5.

		M- (kNm)	M+ (kNm)	V (kN)
Peso próprio		2913	1230	654
RSA	Sl	453	796	121
	Su	1378	900	259
	Sl + Su	1831	1696	380
	VT	1447	1917	387
EC1	LM1 - TS	1475	2225	354
	LM1 - UDL	1716	1029	334
	LM1 - TS + UDL	3191	3254	688
	LM2	354	1410	338
AASHTO	Truck	-	1052	158
	Tandem	-	887	107
	LaneLoad	878	574	166
	Truck + LaneLoad	-	1626	324
	Tandem + LaneLoad	-	1461	273
	2 Truck	1165	-	-
	90% de 2 Truck + LaneLoad	1839	-	-
SATCC	NA - (1)	1742	1440	327
	NA - (2)	358	592	92
	NA - (3)	527	727	126
	NA - (1)+(2)	2100	2032	419
	NB - 36	2023	2243	589
ABNT	Su + VT	2623	2515	528

15.00

Largura considerada para a faixa de rodagem

Vão corrente de 30,00 m

Na tabela 5.14 constam os esforços condicionantes de cada norma, assim como a relação com os valores máximos do RSA.

Tabela 5.14 – Esforços máximos para cada norma e sua relação com o RSA, no caso de estudo 5.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	M- (kNm)	M+ (kNm)	V (kN)	M-	M+	V
RSA	1831	1917	387	1,000	1,000	1,000
EC1	3191	3254	688	1,743	1,697	1,778
AASHTO	1839	1626	324	1,004	0,848	0,837
SATCC	2100	2243	589	1,147	1,170	1,522
ABNT	2623	2515	528	1,433	1,312	1,364

Nas figuras 5.19, 5.20 e 5.21 representam-se os resultados da tabela 5.14 sob a forma gráfica.

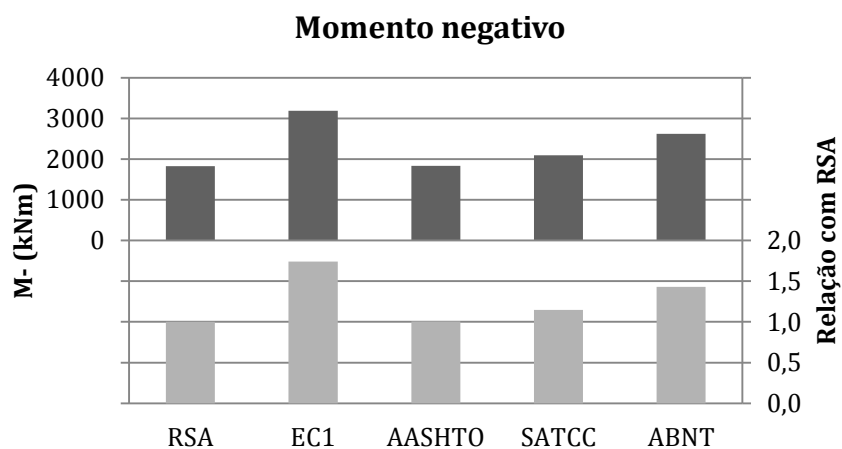


Figura 5.19 – Momentos negativos para o caso de estudo 5.

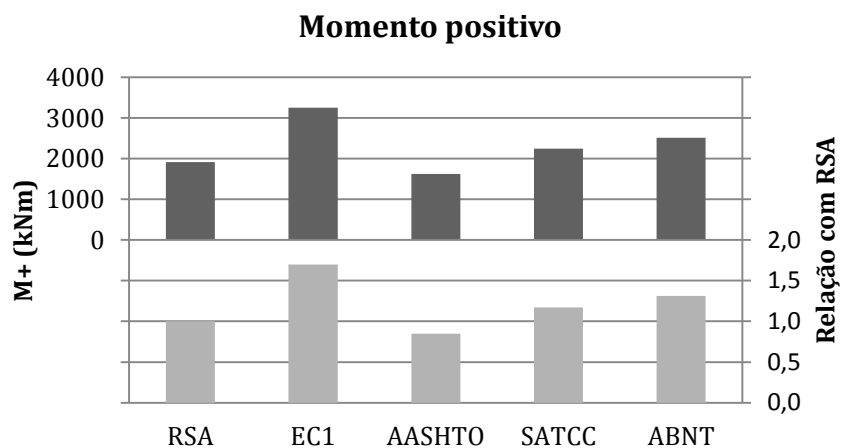


Figura 5.20 – Momentos positivos para o caso de estudo 5.

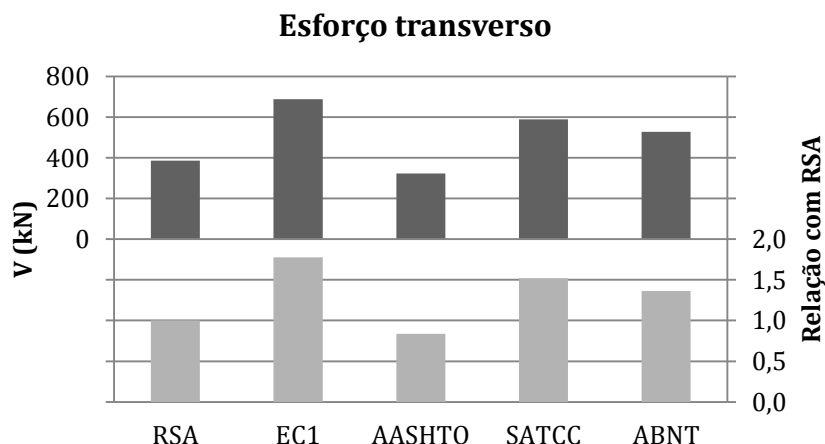


Figura 5.21 – Momentos negativos para o caso de estudo 5.

Neste caso de estudo as diferenças percentuais entre as normas são maiores. Verifica-se que neste tabuleiro o EC1 assume os valores mais gravosos para todos os esforços.

Relativamente ao momento negativo, o EC1 gera um esforço elevado, 74,3% maior que o RSA e 30% superior que o produzido pela ABNT, a segunda norma mais desfavorável. A SATCC é ligeiramente mais gravosa que o RSA, apresentando a AASHTO valores muito semelhantes ao RSA.

No momento fletor positivo verifica-se que as diferenças percentuais são idênticas e que a sequência das normas mais gravosas é igual à do momento fletor negativo, exceto no que se refere à AASHTO, que apresenta um valor 15,2 % inferior ao RSA.

A norma mais gravosa para o esforço transverso é a europeia, seguida da sul-africana, brasileira, portuguesa e por último da norma norte-americana.

Os tabuleiros constituídos por vigas pré-fabricadas são mais sensíveis ao posicionamento das cargas, devido à proximidade das vigas. Este tipo de estruturas tem comportamento diferente relativamente a modelos com cargas uniformes e modelos de cargas pontuais, provocando grandes variações, em certos casos, nos valores dos esforços. Por essa razão, ao contrário dos tabuleiros com vigas betonadas *in-situ*, não é possível prever os modelos de sobrecarga que irão influenciar os momentos fletores e o esforço transverso.

5.2.7 Considerações finais

Os resultados da análise longitudinal confirmam as conclusões obtidas no relatório do LNEC. Os modelos de sobrecargas compostos por cargas concentradas perdem preponderância com o aumento do vão e da largura da plataforma. Contudo, nos casos de estudo com vigas pré-fabricadas, este tipo de modelos tem muita influência nos valores dos esforços finais de tabuleiros de médio vão e maior largura.

Nos últimos casos de estudo também foi evidenciado que a limitação do posicionamento das sobrecargas pode causar esforços menores. Tal é verificado para a norma norte-americana nos últimos três casos de estudo. Os formatos dos modelos da AASHTO não permitiram estabelecer carregamentos mais condicionantes nas vigas exteriores dos tabuleiros, daí a razão desta norma, em tabuleiros constituídos por vigas pré-fabricadas, ser menos desfavorável.

A norma norte-americana, sendo uma norma de referência mundial, só em casos muito particulares é a mais condicionante, sendo genericamente a menos gravosa das cinco normas abordadas. Comparando com o EC1, este induz esforços quase sempre maiores que os da norma norte-americana, chegando a ultrapassar o dobro dos esforços originados por esta última.

Normas que utilizam modelos mais simples, como RSA e ABNT, são em geral menos condicionantes que o EC1, exceto nos casos de estudo iniciais, em que a ABNT penaliza os tabuleiros com sobrecarga nos passeios, tornando-se a mais gravosa em alguns esforços.

Com a análise de tabuleiros dos últimos três casos de estudo verifica-se que o posicionamento dos modelos de sobrecarga é muito importante, como acontece nos casos de estudo 3 e 4, em que a AASHTO é a única norma a penalizar as vigas interiores, enquanto as restantes normas condicionam as vigas exteriores.

5.3 Resultados da análise na direção transversal

5.3.1 Generalidades

Neste subcapítulo foram analisados os momentos máximos na laje, nomeadamente o momento negativo máximo na consola, o máximo momento positivo e negativo nas lajes entre vigas, quer na secção de apoio, onde a carlinga restringe as rotações das vigas, quer na secção de meio vão, onde as vigas têm maior capacidade de rotação e consequentemente fornecem um menor grau de encastramento.

Tal como no subcapítulo anterior, não se considerou o passeio nos casos de estudo 3, 4 e 5.

5.3.2 Caso de estudo 1

5.3.2.1 Variante com 25,00 m de vão corrente

Na tabela 5.15 indicam-se os momentos fletores máximos obtidos no tabuleiro do caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente, para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.15 – Momentos fletores máximos do caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.

		Secção de meio vão			Secção de apoio		
		m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)
Peso próprio		26,47	5,95	32,59	69,07	4,29	70,58
RSA	SI + Su	31,25	25,03	9,56	41,57	20,00	15,05
	VT	31,97	51,07	57,77	50,73	46,38	63,51
EC1	LM1 - TS + UDL	68,37	59,26	41,65	102,80	46,82	50,05
	LM2	47,69	67,51	62,11	61,64	65,13	65,50
AASHTO	Truck + Lane Load	34,16	44,57	31,81	49,19	37,53	37,81
	Tandem + Lane Load	31,61	39,85	30,13	45,58	34,17	34,45
SATCC	NA - 1 + 2	61,19	70,89	56,96	77,81	70,92	61,10
	NA - 3	34,88	37,51	31,27	42,93	36,01	41,07
	NB - 24	25,71	30,65	25,91	44,93	27,58	30,23
ABNT	Su + VT	26,41	43,67	55,73	47,02	37,49	66,54

Vãos correntes de 25,00 m

Nas tabelas 5.16 e 5.17 apresentam-se os esforços condicionantes de cada norma, assim como a relação com os valores máximos do RSA.

Tabela 5.16 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de meio vão e sua relação com o RSA, no caso de estudo 1, na variante de 25,00 m vão correntes.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m-	m+	m _{consola}
RSA	31,97	51,07	57,77	1,000	1,000	1,000
EC1	68,37	67,51	62,11	2,138	1,322	1,075
AASHTO	34,16	44,57	31,81	1,068	0,873	0,551
SATCC	61,19	70,89	56,96	1,914	1,388	0,986
ABNT	26,41	43,67	55,73	0,826	0,855	0,965

Tabela 5.17 – Momentos máximos para cada norma na secção de apoio e a relação com o RSA, no caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m-	m+	m _{consola}
RSA	50,73	46,38	63,51	1,000	1,000	1,000
EC1	102,80	65,13	65,50	2,026	1,404	1,031
AASHTO	49,19	37,53	37,81	0,970	0,809	0,595
SATCC	77,81	70,92	61,10	1,534	1,529	0,962
ABNT	47,02	37,49	66,54	0,927	0,808	1,048

Nas figuras 5.22, 5.23 e 5.24 representam-se os resultados das tabelas 5.16 e 5.17 sob a forma gráfica.

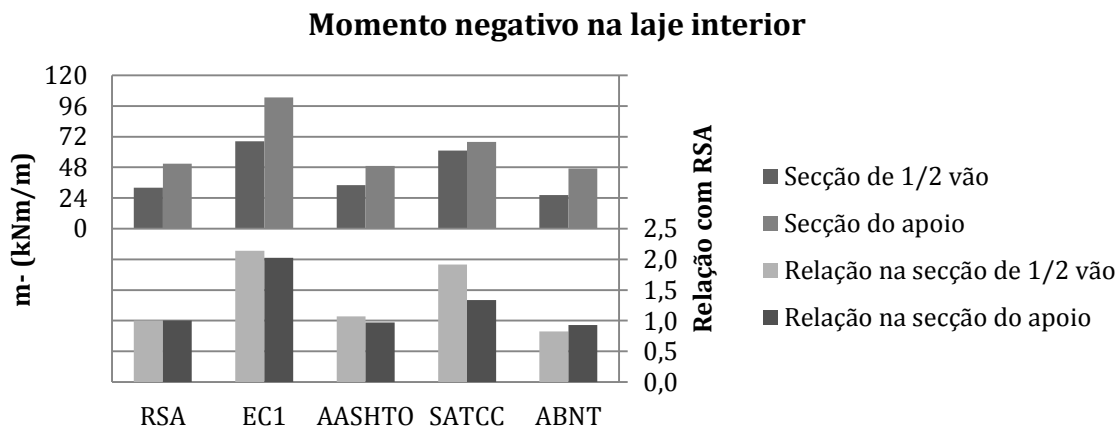


Figura 5.22 – Momentos negativos na laje interior para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.

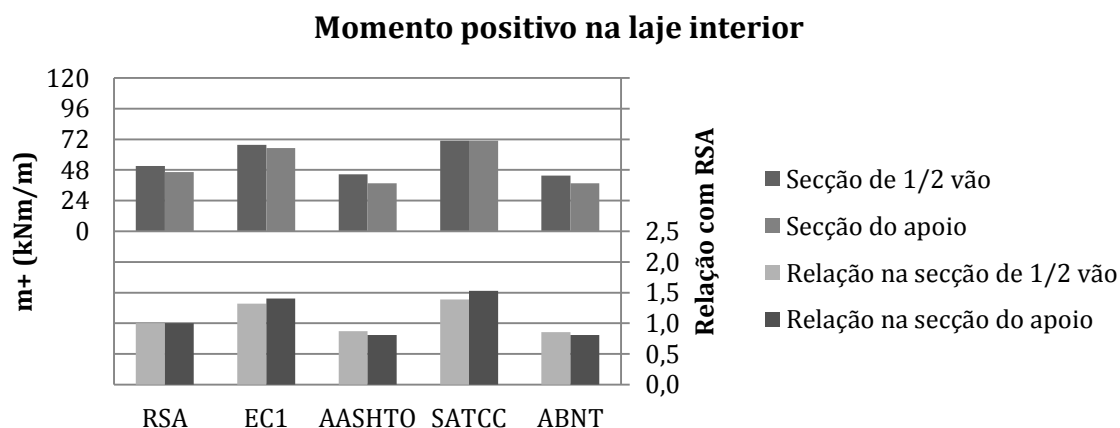


Figura 5.23 – Momentos positivos na laje interior para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.

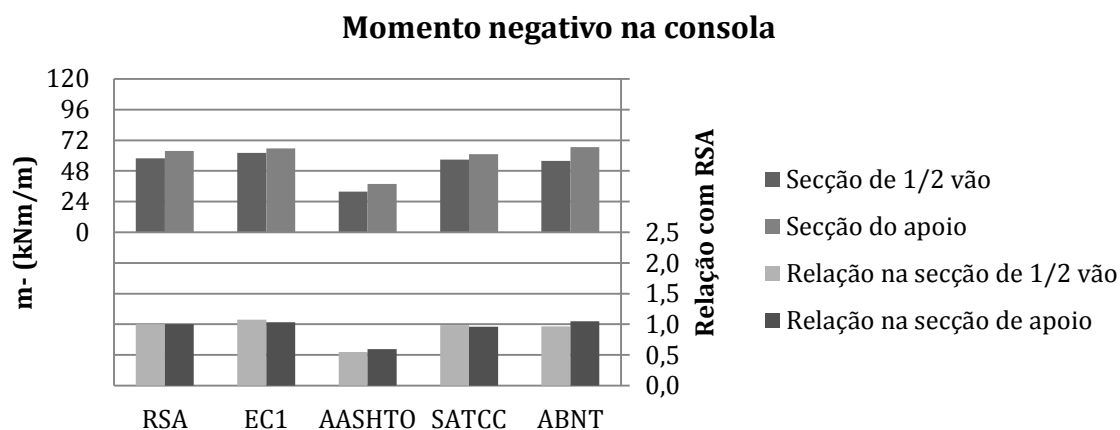


Figura 5.24 – Momentos negativos na consola para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.

Os esforços mais gravosos, em geral, são originados pelo EC1, apesar do momento fletor na consola da ABNT ser ligeiramente superior na secção de apoio. Para este tipo de esforço, também o RSA é uma das normas mais desfavoráveis.

No momento negativo na laje entre vigas verifica-se que a norma europeia é a mais condicionante, com grande diferença para as restantes normas que apresentam valores absolutos semelhantes. De referir que a diferença dos valores entre a secção de apoio e a secção de meio vão é significativa, exceto para o momento gerado pela norma sul-africana, que apresenta valores semelhantes entre as duas secções. Esta semelhança de esforços entre as duas secções é justificada por o modelo condicionante da norma sul-africana ser o modelo das sobrecargas lineares juntamente com as cargas pontuais (NA – 1). Este sistema de cargas provoca menores rotações na viga na secção de meio vão, tornando os esforços dessa secção semelhantes aos da secção de apoio.

Para o momento positivo a meio vão da laje, a norma mais gravosa continua a ser o EC1 e os resultados das restantes normas são muito idênticos entre si. Porém, a norma europeia não apresenta uma diferença percentual tão elevada como no momento negativo na laje (+40%). O RSA é a segunda norma mais gravosa para o momento positivo na laje, mas apresenta um valor próximo aos efeitos produzidos pela ABNT, SATCC e AASHTO (entre 10% e 20% de diferença).

Por fim, para o momento negativo na consola as normas apresentam resultados muito mais próximos entre si. O EC1, o RSA, a SATCC e a ABNT são as normas mais desfavoráveis para este esforço, com diferenças percentuais na ordem de 10%. A AASHTO é a norma menos gravosas, com valor 40% menor que o do RSA.

5.3.2.2 Variante com 40,00 m de vão corrente

Na tabela 5.18 apresentam-se os momentos fletores máximos obtidos no tabuleiro do caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente, para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.18 – Momentos fletores máximos do caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.

		Secção de meio vão			Secção de apoio		
		m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)
Peso próprio		25,39	8,72	33,33	82,11	4,21	96,94
RSA	Sl + Su	29,08	27,68	11,03	40,91	19,92	15,34
	VT	33,35	52,26	60,12	50,30	46,30	63,70
EC1	LM1 - TS + UDL	77,77	79,49	74,21	118,74	70,03	82,08
	LM2	66,52	68,28	65,83	71,87	65,09	67,52
AASHTO	Truck + Lane Load	33,87	47,75	33,48	50,04	37,59	38,07
	Tandem + Lane Load	33,24	42,44	31,10	46,64	34,04	35,17
SATCC	NA - 1 + 2	56,12	68,13	57,81	78,44	56,52	63,47
	NA - 3	29,11	42,73	52,94	37,04	40,96	54,97
	NB - 24	27,64	40,19	25,79	40,74	30,67	30,76
ABNT	Su + VT	27,15	48,20	55,89	49,27	37,32	59,69

Vão corrente de 40,00 m

Nas tabelas 5.19 e 5.20 apresentam-se os esforços condicionantes de cada norma, assim como a relação com os valores condicionantes do RSA.

Tabela 5.19 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de meio vão e sua relação com o RSA, no caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)
RSA	33,35	51,96	60,12	1,000	1,000	1,000
EC1	77,77	83,81	74,21	2,332	1,613	1,234
AASHTO	33,87	47,75	33,48	1,016	0,919	0,557
SATCC	30,95	42,73	52,94	0,928	0,822	0,881
ABNT	27,15	48,20	55,89	0,814	0,928	0,930

Tabela 5.20 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de apoio e sua relação com o RSA, caso de estudo 1, na variante de 40,00 m de vão corrente.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)
RSA	50,30	46,30	63,70	1,000	1,000	1,000
EC1	118,74	70,03	82,08	2,361	1,513	1,289
AASHTO	50,04	37,59	38,07	0,995	0,812	0,598
SATCC	78,44	56,52	63,47	1,559	1,221	0,996
ABNT	49,27	37,32	59,69	0,980	0,806	0,937

Nas figuras 5.25, 5.26 e 5.27 ilustram-se os resultados das tabelas 5.19 e 5.20 sob a forma gráfica.

Momento negativo na laje interior

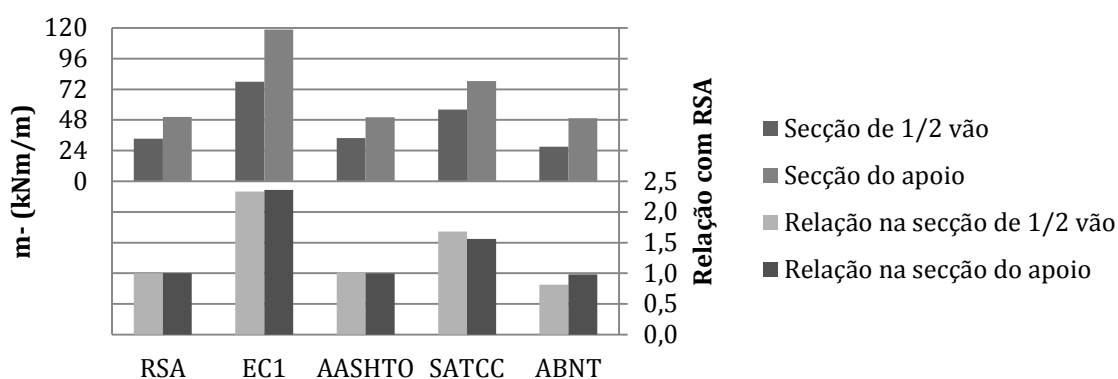


Figura 5.25 – Momentos negativos na laje interior para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.

Momento positivo na laje interior

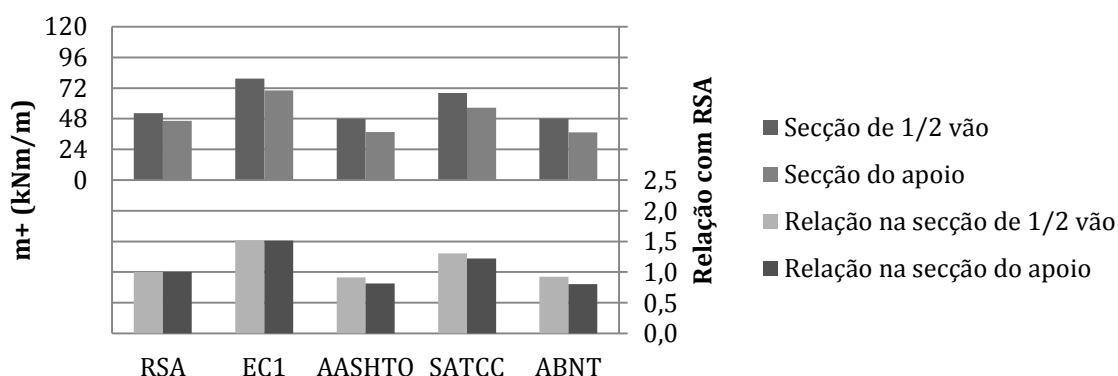


Figura 5.26 – Momentos positivos na laje interior para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.

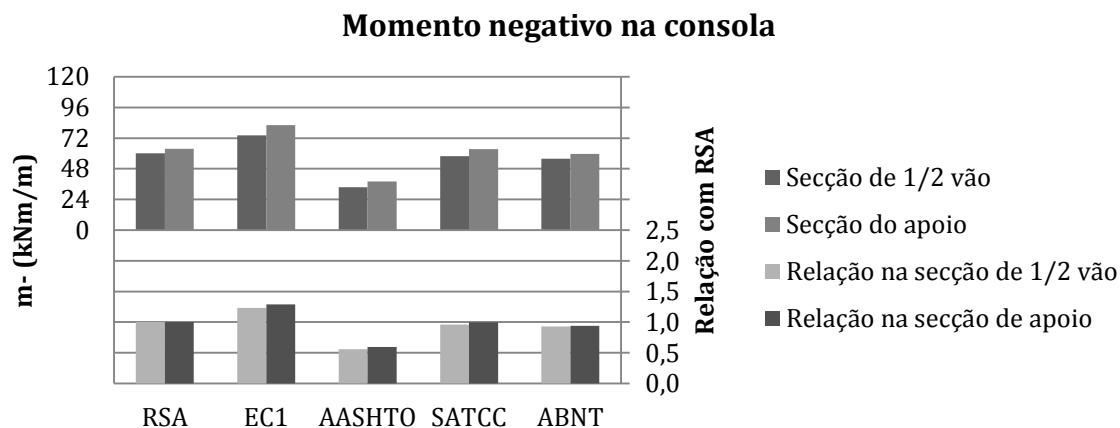


Figura 5.27 – Momentos negativos na laje em consola para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.

A geometria da laje do tabuleiro é idêntica à da variante anterior, mas o vão aumenta de 25,00 m para 40,00 m. Este aumento do vão não originou alterações significativas em termos da sequência das normas gravosas, nem do índice de relação com o RSA. Porém, o modelo condicionante da norma europeia, nesta variante, passa a ser o LM1, aumentando significativamente a razão com o RSA. O modelo LM1, por ser constituído por sobrecargas uniformes e pontuais, causa maiores rotações nas vigas, pelo que o momento fletor positivo aumenta.

Os modelos condicionantes de cada norma são, em regra, os modelos de sobrecargas concentradas, o que justifica a semelhança de resultados das duas variantes. Assim, o aumento do vão tem pouca influência nos valores dos esforços em tabuleiros estreitos.

5.3.3 Caso de estudo 2

5.3.3.1 Variante com 25,00 m de vão corrente

Na tabela 5.21 constam os momentos fletores máximos obtidos no tabuleiro do caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente, para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.21 – Momentos fletores máximos do caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.

		Secção de meio vão			Secção de apoio		
		m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)
Peso próprio		52,85	17,73	57,43	113,08	10,81	131,89
RSA	Sl + Su	39,44	37,77	28,21	50,91	31,05	38,14
	VT	48,37	66,68	71,24	65,00	61,60	82,64
EC1	LM1 - TS + UDL	84,64	97,07	93,51	116,24	86,78	119,44
	LM2	53,44	77,83	79,63	64,11	74,82	77,38
AASHTO	Truck + Lane Load	40,79	53,39	42,11	62,24	46,21	56,37
	Tandem + Lane Load	49,43	49,39	46,40	59,48	42,74	54,49
SATCC	NA - 1 + 2	39,63	60,06	46,73	51,83	40,32	49,33
	NA - 3	24,88	49,15	62,93	31,79	47,39	69,08
	NB - 36	59,13	77,86	87,53	90,65	67,40	102,13
ABNT	Su + VT	42,58	59,93	67,14	64,87	52,97	92,71

Diagrama de uma ponte com um vão corrente de 25,00 m. A largura total da ponte é de 15,00 m, e a largura da faixa de rodagem e bermas é de 12,50 m. A altura da ponte é de 1,80 m.

Nas tabelas 5.22 e 5.23 indicam-se os esforços condicionantes de cada norma, assim como a relação com os valores máximos do RSA.

Tabela 5.22 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de meio vão e sua relação com o RSA, no caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)
RSA	48,37	66,68	71,24	1,000	1,000	1,000
EC1	84,64	97,07	93,51	1,750	1,456	1,313
AASHTO	49,43	53,39	46,40	1,022	0,801	0,651
SATCC	59,13	77,86	87,53	1,222	1,168	1,229
ABNT	42,58	59,93	67,14	0,880	0,899	0,942

Tabela 5.23 – Momentos fletores para cada norma na secção de apoio e sua relação com o RSA, no caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m-	m+	m _{consola}
RSA	65,00	61,60	82,64	1,000	1,000	1,000
EC1	116,24	86,78	119,44	1,788	1,409	1,445
AASHTO	62,24	46,21	56,37	0,958	0,750	0,682
SATCC	90,65	67,40	102,13	1,395	1,094	1,236
ABNT	64,87	52,97	92,71	0,998	0,860	1,122

Nas figuras 5.28, 5.29 e 5.30 ilustram-se os resultados das tabelas 5.22 e 5.23 sob a forma gráfica.

Momento negativo na laje interior

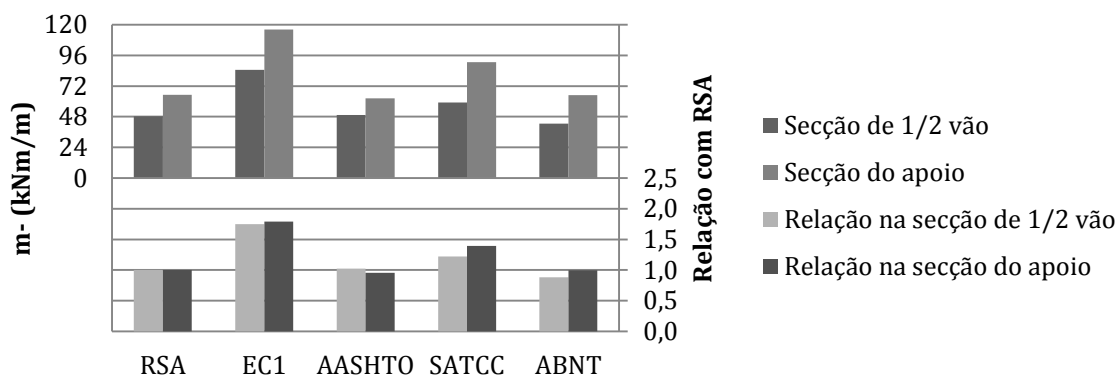


Figura 5.28 – Momentos negativos na laje interior para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.

Momento positivo na laje interior

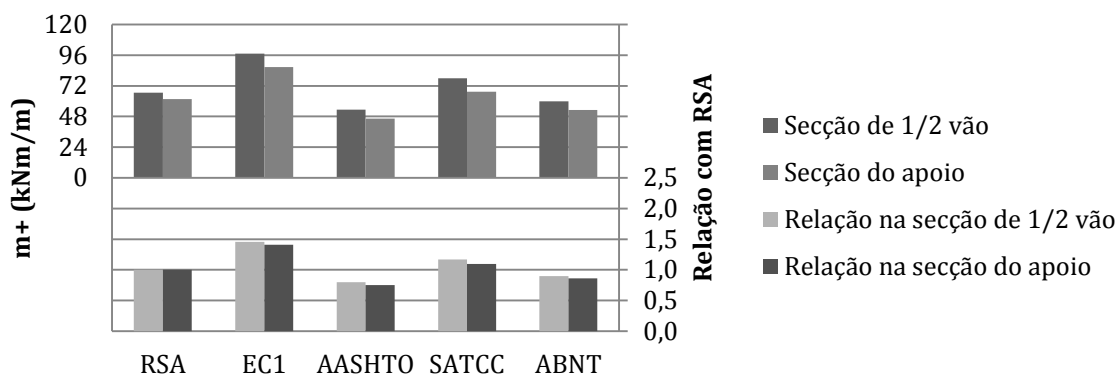


Figura 5.29 – Momentos positivos na laje interior para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.

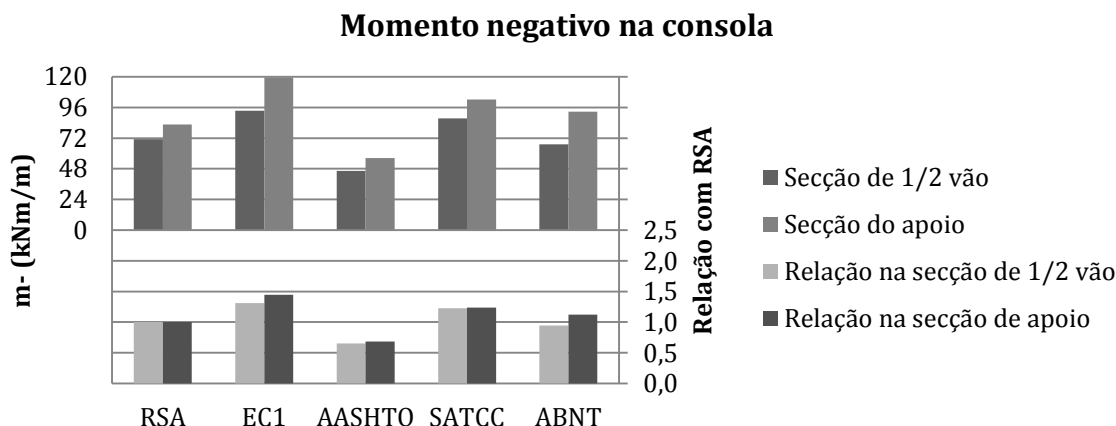


Figura 5.30 – Momentos negativos na laje em consola para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.

O aumento da largura do tabuleiro, face ao caso de estudo anterior, provocou algumas alterações significativas nos resultados, apesar do EC1 continuar a ser a norma mais condicionante.

Da análise do momento negativo na laje, verifica-se que a norma sul-africana é a que mais se aproxima do EC1. As restantes normas apresentam diferenças máximas entre si de 12%, tendo valores mais próximas na secção de apoio.

Os momentos positivos maiores são devidos ao EC1. A SATCC assume-se como a segunda norma mais gravosa, seguida do RSA, da norma brasileira e da norma norte-americana. As duas últimas são as menos desfavoráveis devido à menor intensidade que as suas sobrecargas pontuais apresentam.

Para o momento negativo na consola, mais uma vez o EC1 produz os maiores esforços, seguido da SATCC. Visto que a consola teve maior balanço, a sobrecarga uniforme da norma brasileira tornou-se mais influente, razão pela qual a ABNT se tornou mais gravosa 12,2% que o RSA. A norma menos penalizante volta a ser a AASHTO, que com a suas cargas pontuais pouco intensas e demasiado espaçadas entre si são menos gravosas que as face às restantes normas.

De salientar que, neste caso de estudo, o *NB loading* da SATCC é o modelo de sobrecarga condicionante, tornando-se na segunda norma mais desfavorável. Este modelo, para tabuleiros de largura igual ou superior a 15,00 m, muda de intensidade, passando de 60 kN/roda para 90 kN/roda. Este modelo induziu esforços consideráveis face aos outros modelos de sobrecarga da norma, como se pode verificar na tabela 5.21.

5.3.3.2 Variante com 40,00 m de vão corrente

Na tabela 5.24 apresentam-se os momentos fletores máximos obtidos no tabuleiro do caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente, para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.24 – Momentos fletores máximos do caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.

		Secção de meio vão			Secção de apoio		
		m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)
Peso próprio		58,27	14,22	61,15	113,29	10,43	141,60
RSA	SI + Su	38,54	40,66	28,77	52,56	30,60	38,21
	VT	48,61	67,62	77,29	61,05	60,84	88,93
EC1	LM1 - TS + UDL	89,01	106,06	93,75	115,01	89,56	117,74
	LM2	53,94	78,70	80,65	63,51	75,01	89,00
AASHTO	Truck + Lane Load	39,89	57,56	42,86	58,91	41,18	54,31
	Tandem + Lane Load	46,47	52,15	48,05	58,60	41,73	53,79
SATCC	NA - 1 + 2	44,50	70,40	43,56	71,41	52,60	64,32
	NA - 3	23,11	44,60	56,62	27,10	42,26	58,77
	NB - 36	56,28	81,33	90,52	85,10	65,64	101,12
ABNT	Su + VT	39,80	65,84	69,00	66,53	48,48	90,08

Vão corrente de 40,00 m

Nas tabelas 5.25 e 5.26 indicam-se os esforços condicionantes de cada norma, assim como a relação com os valores máximos do RSA.

Tabela 5.25 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de meio vão e sua relação com o RSA, no caso de estudo 2, na variante de 40,00 m de vão correntes.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)
RSA	48,61	67,62	77,29	1,000	1,000	1,000
EC1	89,01	106,06	93,75	1,831	1,568	1,213
AASHTO	46,47	57,56	48,05	0,956	0,851	0,622
SATCC	56,28	81,33	90,52	1,158	1,203	1,171
ABNT	39,80	65,84	69,00	0,819	0,974	0,893

Tabela 5.26 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de apoio e a sua relação com o RSA, no caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m-	m+	m _{consola}
RSA	61,05	60,84	88,93	1,000	1,000	1,000
EC1	115,01	89,56	117,74	1,884	1,472	1,324
AASHTO	58,91	41,73	54,31	0,965	0,686	0,611
SATCC	85,10	65,64	101,12	1,394	1,079	1,137
ABNT	66,53	48,48	90,08	1,090	0,797	1,013

Nas figuras 5.31, 5.32 e 5.33 ilustram-se os resultados das tabelas 5.25 e 5.26 sob a forma gráfica.

Momento negativo na laje interior

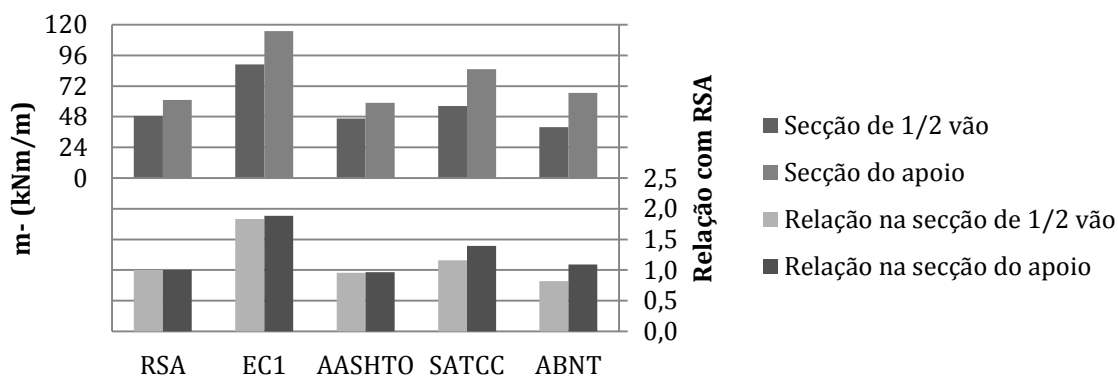


Figura 5.31 – Momentos negativos na laje interior para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.

Momento positivo na laje interior

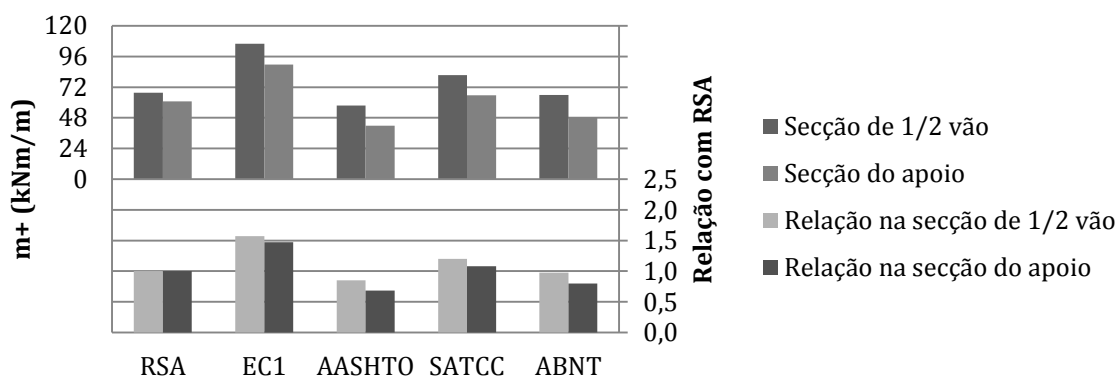


Figura 5.32 – Momentos positivos na laje interior para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.

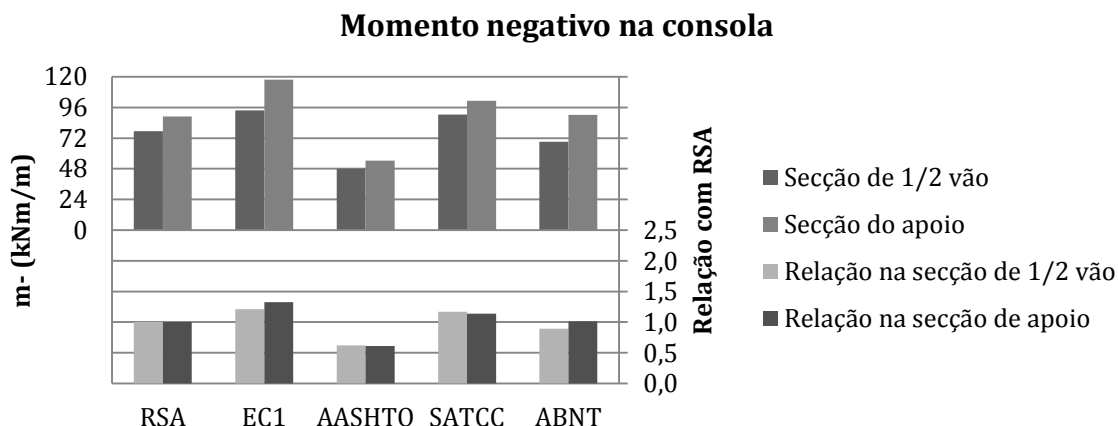


Figura 5.33 – Momentos negativos na laje em consola para o caos de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.

Novamente se verifica que não ocorrem alterações significativas, em termos de relações percentuais entre normas, da variante de 25,00 m para a variante de 40,00 m.

Como visto anteriormente, as relações percentuais que sofrem maiores alterações são as do EC1, pelas razões já explicadas no caso de estudo anterior. Porém, verificam-se algumas variações nas outras normas, nunca superiores a 15%, que geraram alterações na hierarquia das normas mais desfavoráveis, da variante de 25,00 m para a variante de 40,00 m.

Neste tabuleiro largo e de vão mais extenso, evidencia-se a influência que a rotação das vigas tem nos valores dos momentos fletores. Tome-se como exemplo os esforços obtidos pelo RSA (o modelo condicionante é o veículo tipo) e a ABNT, cujos modelos de sobrecarga são semelhantes mas diferenciam-se por a norma brasileira considerar, adicionalmente, uma sobrecarga uniforme. Efetivamente, da secção de apoio para a secção de meio vão, a relação percentual entre o momento fletor negativo das duas normas aumenta, enquanto que no momento fletor positivo essa relação diminui. Este aspeto evidencia que a rotação das vigas, na secção de meio vão, aumenta significativamente os valores dos momentos positivos em relação à secção de apoio, diminuindo consequentemente os valores dos momentos negativos.

5.3.4 Caso de estudo 3

Na tabela 5.27 constam os momentos fletores máximos obtidos no tabuleiro do caso de estudo 3, para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.27 – Momentos fletores máximos do caso de estudo 3.

		Secção de meio vão			Secção de apoio		
		m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)
Peso próprio		1,51	0,97	2,50	14,60	1,01	17,89
RSA	SI + Su	14,26	9,71	8,77	21,62	7,38	11,84
	VT	43,12	27,32	41,99	49,91	20,94	45,48
EC1	LM1 - TS + UDL	59,04	36,30	53,70	72,01	29,84	58,75
	LM2	31,28	48,09	60,59	35,96	45,03	62,56
AASHTO	Truck + Lane Load	37,25	26,36	29,87	46,67	22,12	33,27
	Tandem + Lane Load	32,69	20,01	29,42	40,16	16,23	32,02
SATCC	NA - 1 + 2	36,50	19,79	29,99	39,83	18,43	35,67
	NA - 3	6,60	25,11	36,70	13,02	20,65	39,99
	NB - 24	13,15	13,07	26,87	23,11	12,48	34,53
ABNT	Su + VT	36,34	23,03	35,35	46,47	15,18	41,35

Diagrama de uma ponte com três vãos. O vão central é rotulado como "Vão corrente de 30,00 m". A largura total da ponte é indicada como "6.50" e rotulada como "Largura considerada para a faixa de rodagem".

Nas tabelas 5.28 e 5.29 indicam-se os esforços condicionantes de cada norma, assim como a relação com os valores máximos do RSA.

Tabela 5.28 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de meio vão e sua relação com o RSA, do caso de estudo 3.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m-	m+	m _{consola}
RSA	43,12	27,32	41,99	1,000	1,000	1,000
EC1	59,04	48,09	60,59	1,369	1,760	1,443
AASHTO	37,25	26,36	29,87	0,864	0,965	0,711
SATCC	36,50	25,11	36,70	0,846	0,919	0,874
ABNT	36,34	23,03	35,35	0,843	0,843	0,842

Tabela 5.29 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de apoio e sua relação com o RSA, do caso de estudo 3.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)
RSA	49,91	20,94	45,48	1,000	1,000	1,000
EC1	72,01	45,03	62,56	1,443	2,150	1,376
AASHTO	46,67	22,12	33,27	0,935	1,056	0,732
SATCC	39,83	20,65	39,99	0,798	0,986	0,879
ABNT	46,47	15,18	41,35	0,931	0,725	0,909

Nas figuras 5.34, 5.35 e 5.36 ilustram-se os resultados das tabelas 5.28 e 5.29 sob a forma gráfica.

Momento negativo na laje interior

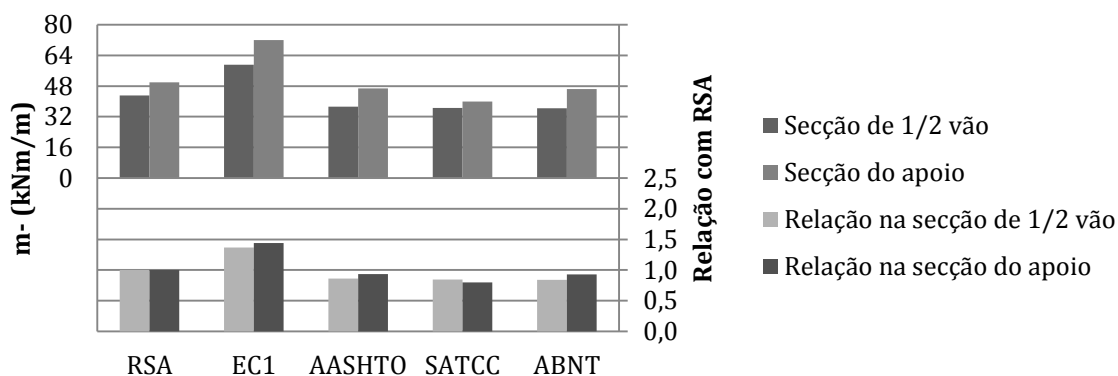


Figura 5.34 – Momentos negativos na laje interior para o caso de estudo 3.

Momento positivo na laje interior

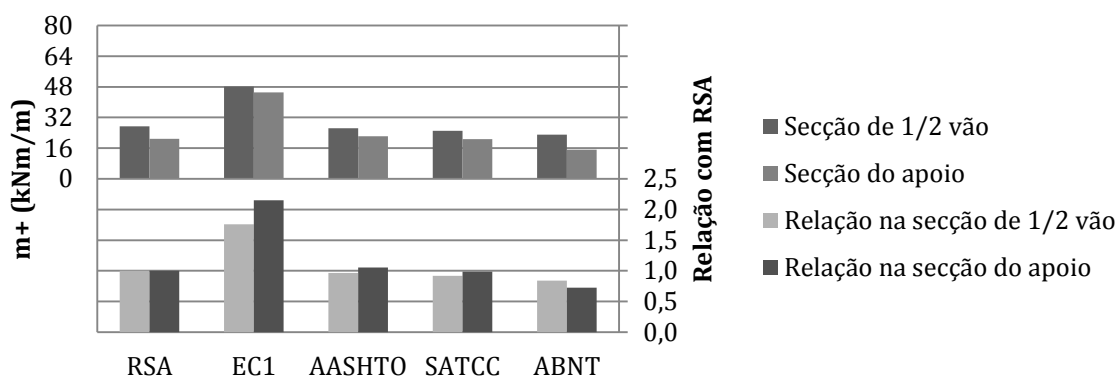


Figura 5.35 – Momentos positivos na laje interior para o caso de estudo 3.

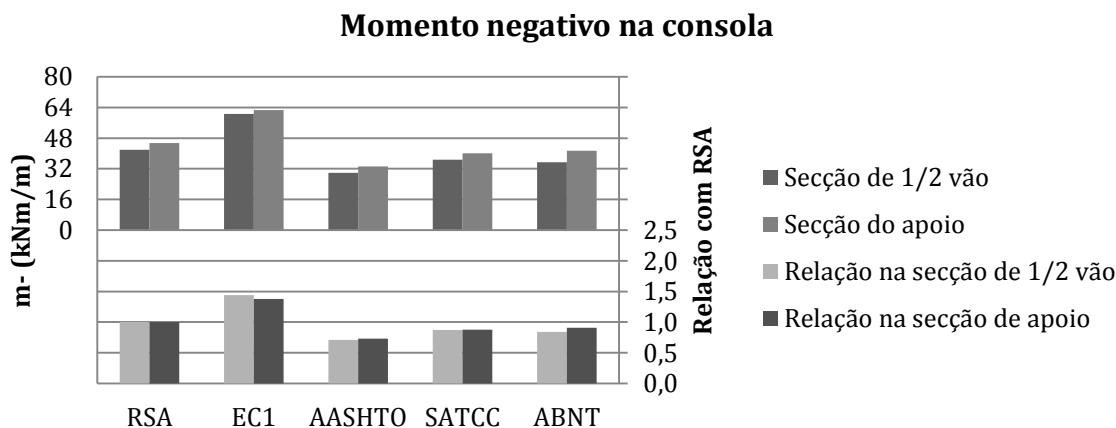


Figura 5.36 – Momentos negativos na laje em consola para o caso de estudo 3.

Neste caso de estudo, ao contrário dos casos anteriores, onde só existia uma secção possível para ocorrer o momento fletor máximo negativo, foi necessário realizar uma análise prévia para determinar quais as secções onde os momentos fletores negativos são máximos. Com base no RSA, a norma de referência, efetuaram-se vários carregamentos de forma a testar todas as linhas de influência possíveis. Verificou-se que o RSA condiciona o momento negativo na laje junto à viga intermédia. O momento positivo é máximo entre a viga central e a exterior.

A consola deste tabuleiro é muito curta (1,05 m), bem como a laje intermédia (2,20 m entre eixos das vigas). Por essa razão, as forças concentradas influenciam mais os esforços finais.

Para o momento negativo no interior da laje, a ABNT, a AASHTO e a SACTT originam esforços, em média, 15% menores que o RSA. É de salientar a diferença que se verifica entre os valores obtidos na secção de meio vão e na secção de apoio para este mesmo esforço. Esta diferença deve-se à rotação das vigas na secção de meio vão, que assim reduz o momento fletor negativo e aumenta o momento fletor positivo.

Relativamente ao momento positivo, devido à divisão do tabuleiro em vias fictícias na SATCC e da AASHTO, obtêm-se valores semelhantes ao RSA. A ABNT é a norma menos desfavorável para este efeito, ao contrário do EC1, que é a norma mais gravosa.

5.3.5 Caso de estudo 4

Na tabela 5.30 apresentam-se os momentos fletores máximos obtidos no tabuleiro do caso de estudo 4, para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.30 – Momentos fletores máximos do caso de estudo 4.

		Secção de meio vão			Secção de apoio		
		m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)
Peso próprio		1,31	1,90	2,23	12,40	1,23	13,03
RSA	Sl + Su	6,67	10,17	8,33	16,38	7,41	9,62
	VT	6,39	26,70	36,08	18,83	19,97	38,99
EC1	LM1 - TS + UDL	6,11	35,03	46,73	26,39	28,13	48,55
	LM2	12,42	46,65	56,21	35,15	43,75	57,22
AASHTO	Truck + Lane Load	8,38	20,19	24,23	18,34	18,12	25,19
	Tandem + Lane Load	6,29	15,57	22,55	14,88	13,15	23,73
SATCC	NA - 1 + 2	7,04	21,56	27,97	16,93	17,90	30,02
	NA - 3	3,05	23,93	34,60	10,60	19,70	35,60
	NB - 36	2,65	14,92	20,89	12,49	11,76	21,54
ABNT	Su + VT	3,77	21,25	30,79	17,46	25,74	31,51

14,00

Largura considerada para a faixa de rodagem

Vão corrente de 30,00 m

Nas tabelas 5.31 e 5.32 indicam-se os esforços condicionantes de cada norma, assim como a relação com os valores máximos do RSA.

Tabela 5.31 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de meio vão e sua relação com o RSA, do caso de estudo 4.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m-	m+	m _{consola}
RSA	6,67	26,70	36,08	1,000	1,000	1,000
EC1	12,42	46,65	56,21	1,862	1,747	1,558
AASHTO	8,38	20,19	24,23	1,256	0,756	0,672
SATCC	7,04	23,93	34,60	1,055	0,896	0,959
ABNT	3,77	21,25	30,79	0,565	0,796	0,853

Tabela 5.32 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de apoio e sua relação com o RSA, do caso de estudo 4.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m-	m+	m _{consola}
RSA	18,83	19,97	38,99	1,000	1,000	1,000
EC1	35,15	43,75	57,22	1,867	2,191	1,468
AASHTO	18,34	18,12	25,19	0,974	0,907	0,646
SATCC	16,93	19,70	35,60	0,899	0,986	0,913
ABNT	17,46	25,74	31,51	0,927	1,289	0,808

Nas figuras 5.37, 5.38 e 5.39 ilustram-se os resultados das tabelas 5.31 e 5.32 sob a forma gráfica.

Momento negativo na laje interior

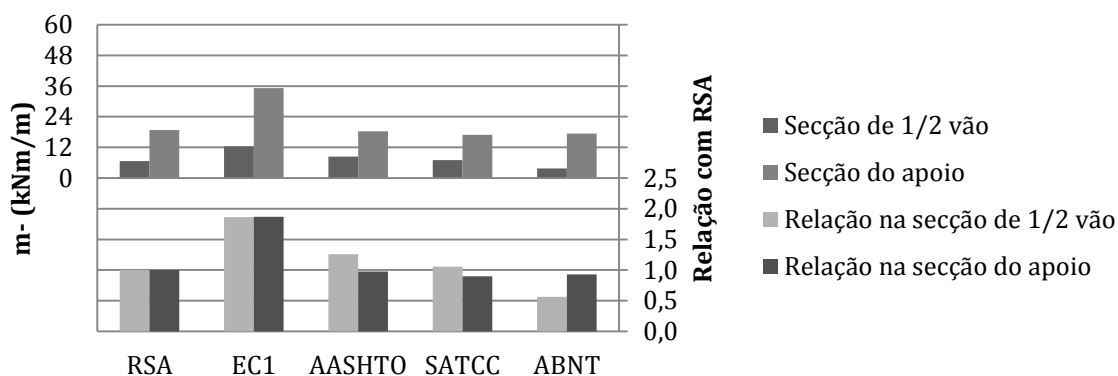


Figura 5.37 – Momentos negativos na laje interior para o caso de estudo 4.

Momento positivo na laje interior

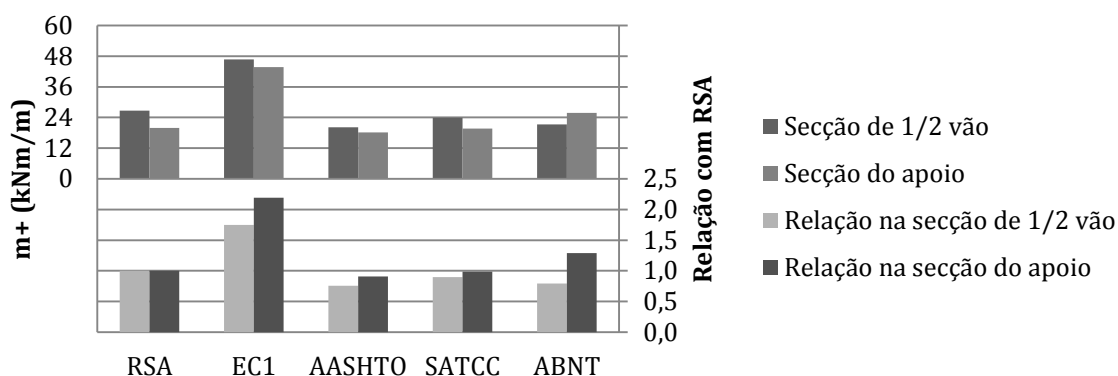


Figura 5.38 – Momentos positivos na laje interior para o caso de estudo 4.

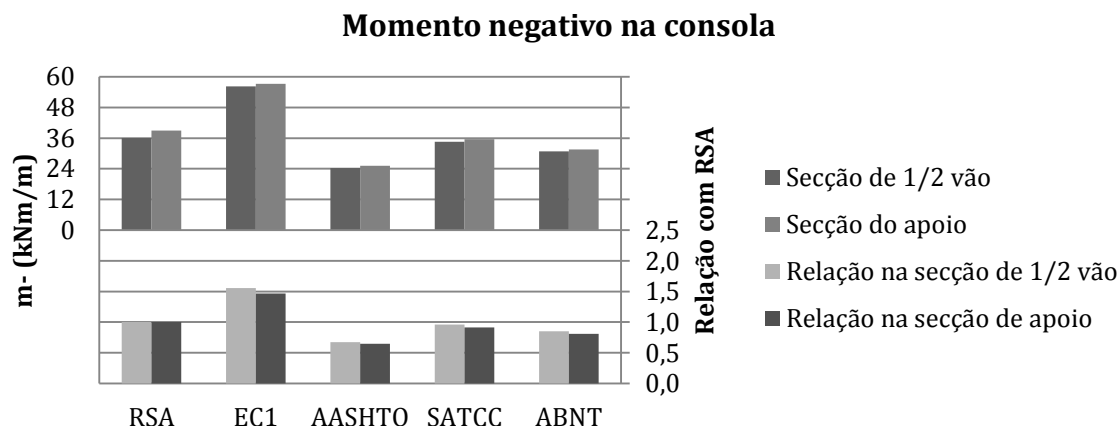


Figura 5.39 – Momentos negativos na laje em consola para o caso de estudo 4.

À semelhança do caso de estudo anterior, foi necessário realizar uma análise prévia para determinar as secções onde ocorrem os momentos máximos para os modelos do RSA. Esse estudo indicou que o momento máximo negativo ocorre na laje adjacente à viga central e que o momento fletor positivo máximo surge a meio da laje entre as vigas exteriores.

As deformadas do tabuleiro obtidas devido aos carregamentos das diferentes normas, evidenciaram a pouca resistência que as vigas oferecem, na secção de apoio, para resistir ao momento negativo na laje. Em geral, o valor deste esforço é pouco significativo quando comparado com o momento máximo positivo. Tal se justifica, mais uma vez, pelo facto das vigas permitirem deslocamentos verticais e rotações. Conclui-se assim que, na secção de meio vão, as condições de apoio fornecidas pelas vigas são praticamente de uma laje simplesmente apoiada.

Para o momento positivo na laje e para o momento negativo na consola, a AASHTO, a SATCC e a ABNT são as normas menos condicionantes, apresentando esforços muito próximos entre si, mas sempre inferiores aos esforços do RSA. O EC1 é a norma mais gravosa, apresentando esforços muito superiores aos do RSA.

Dadas as semelhanças geométricas dos tabuleiros dos casos de estudo 3 e 4, a relação entre os esforços das diferentes normas não apresentou muitas diferenças. No entanto, o momento na consola gerado pela AASHTO é bastante mais reduzido, devido ao maior número de vias fictícias que existe no caso de estudo 4. O aumento do número de vias, no caso desta norma, implicou uma diminuição da intensidade das cargas pontuais devido ao fator de múltipla presença.

5.3.6 Caso de estudo 5

Na tabela 5.33 apresentam-se os momentos fletores máximos obtidos no tabuleiro do caso de estudo 5, para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.33 – Momentos fletores máximos do caso de estudo 5.

		Secção de meio vão			Secção de apoio		
		m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)
Peso próprio		5,77	2,11	11,04	23,87	1,99	26,42
RSA	SI + Su	26,51	19,05	22,85	38,71	14,16	25,56
	VT	14,90	30,05	70,82	38,34	24,31	76,29
EC1	LM1 - TS + UDL	29,19	45,40	74,55	53,42	32,93	88,25
	LM2	39,30	57,42	61,27	55,63	54,69	65,13
AASHTO	Truck + Lane Load	17,06	28,93	23,91	35,89	23,44	28,49
	Tandem + Lane Load	16,76	26,68	27,46	35,57	21,94	30,68
SATCC	NA - 1 + 2	15,15	29,38	36,55	25,88	24,48	39,96
	NA - 3	14,77	32,81	50,73	23,79	26,42	54,51
	NB - 36	19,77	48,36	68,75	59,55	38,70	70,10
ABNT	Su + VT	14,78	29,85	56,10	39,87	25,47	62,78

15.00

Largura considerada para a faixa de rodagem

Vão corrente de 30,00 m

Nas tabelas 5.34 e 5.35 indicam-se os esforços condicionantes de cada norma, assim como a relação com os valores máximos do RSA.

Tabela 5.34 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de meio vão e sua relação com o RSA, do caso de estudo 5.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)
RSA	26,51	30,05	70,82	1,000	1,000	1,000
EC1	39,30	57,42	74,55	1,482	1,911	1,053
AASHTO	17,06	28,93	27,46	0,644	0,963	0,388
SATCC	19,77	48,36	68,75	0,746	1,609	0,971
ABNT	14,78	29,85	56,10	0,558	0,993	0,792

Tabela 5.35 – Momentos fletores máximos para cada norma na secção de apoio e sua relação com o RSA, do caso de estudo 5.

	Valor absoluto			Relação com o RSA		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m-	m+	m _{consola}
RSA	38,71	24,31	76,29	1,000	1,000	1,000
EC1	55,63	54,69	88,25	1,437	2,250	1,157
AASHTO	35,89	23,44	30,68	0,927	0,964	0,402
SATCC	59,55	38,70	70,10	1,538	1,592	0,919
ABNT	39,87	25,47	62,78	1,030	1,048	0,823

Nas figuras 5.40, 5.41 e 5.42 ilustram-se os resultados das tabelas 5.34 e 5.35 sob a forma gráfica.

Momento negativo na laje interior

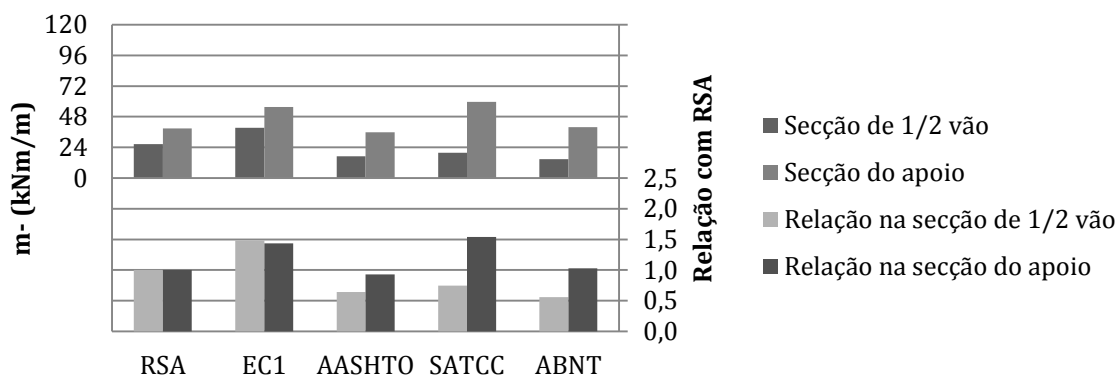


Figura 5.40 – Momentos negativos na laje interior para o caso de estudo 5.

Momento positivo na laje interior

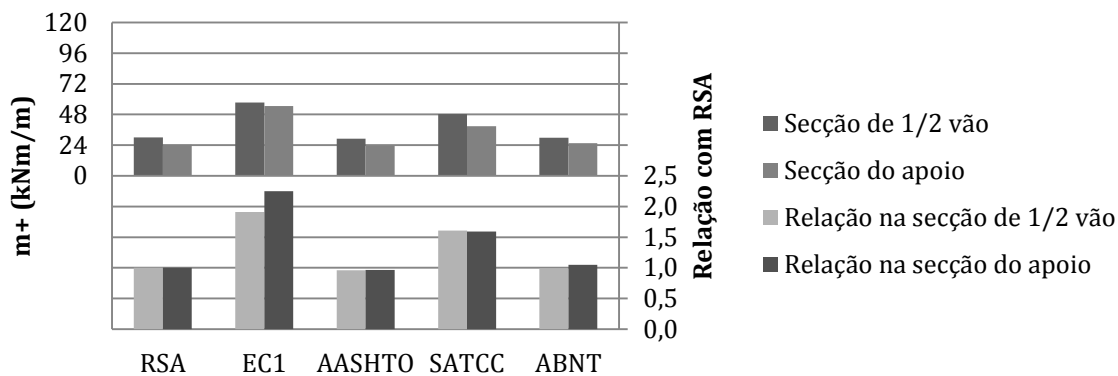


Figura 5.41 – Momentos positivos na laje interior para o caso de estudo 5.

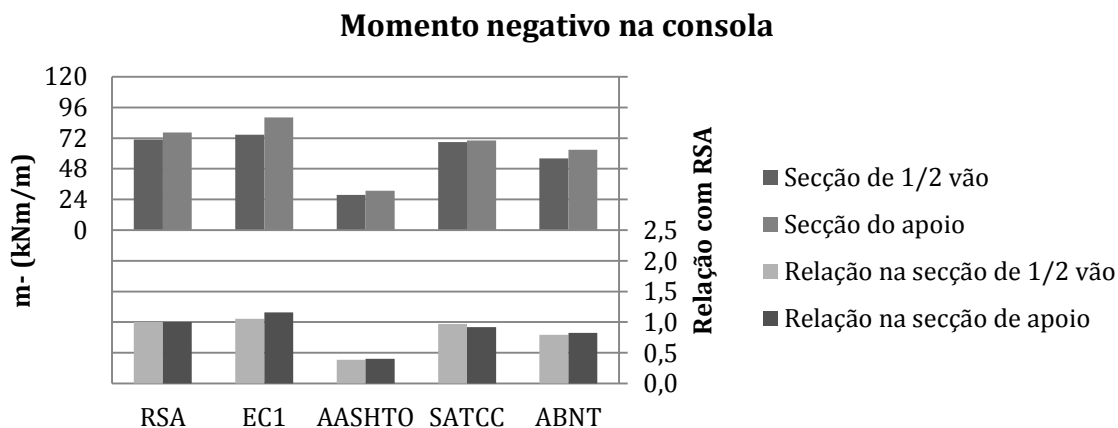


Figura 5.42 – Momentos negativos na laje em consola para o caso de estudo 5.

Para este caso de estudo também se realizou uma análise prévia a fim de determinar as secções com momentos mais condicionantes. Tal como no caso anterior, o momento fletor máximo positivo surge entre a viga interior e a viga exterior, e o momento fletor máximo negativo obtém-se na secção adjacente à viga interior.

O EC1, apesar de continuar a ser a norma mais gravosa, induz esforços com diferença percentual dos esforços para o RSA, para o momento negativo na consola de apenas 5% na secção de meio vão e 15% na secção de apoio. Esta proximidade dos valores entre as duas normas deve-se ao balanço da consola, que neste caso de estudo é de 2,10 m. Pelo facto da consola deste tabuleiro ser maior, o veículo tipo produz esforços de maior valor dado o seu formato e a intensidade das suas cargas pontuais.

Verifica-se que a relação do momento negativo no interior da laje, da secção de meio vão para a secção de apoio, sofre grandes alterações. Esta diferença ocorre devido à falta de rigidez das vigas pré-fabricadas que, na secção de meio vão, reduzem significativamente os momentos negativos da laje devido aos deslocamentos verticais e às rotações das vigas, enquanto que na secção de apoio, devido ao encastramento fornecido pela carlinga e pelos pilares, torna a ligação mais rígida entre a laje e as vigas.

5.3.7 Considerações finais

O RSA e o EC1 definem, cada um, dois modelos de sobrecargas que se complementam e que permitem analisar, de forma eficaz, os momentos fletores que ocorrem em tabuleiros de diferentes características, nomeadamente em tabuleiros estreitos com consolas curtas e tabuleiros largos com consolas maiores.

A norma brasileira, constituída por um único modelo de sobrecarga, não é tão gravosa como o RSA e o EC1. Em consolas e painéis curtos, o modelo da ABNT não provoca esforços tão elevados, visto que o sistema de cargas pontuais é menos intenso.

Por outro lado, a AASHTO só define modelos que consideram a divisão do tabuleiro em diversas vias, impedindo por isso, na maioria das situações, posicionar os seus modelos de sobrecargas de forma a maximizar o esforço. Essa condicionante torna a norma norte-americana menos gravosa no que se refere à análise dos momentos fletores transversais, quer para tabuleiros estreitos, quer para tabuleiros largos. Por essa razão, aliado ao facto da mesma norma definir um fator de múltipla presença, os momentos transversais da AASHTO apresentam valores mais reduzidos face aos das restantes normas.

Para cada modelo de sobrecarga aplicado nos 5 casos de estudo, o momento positivo máximo foi sempre maior na secção de meio vão e os momentos negativos no interior da laje e nas consolas ocorreram sempre na secção de apoio. Este comportamento estrutural deve-se ao grau de encastramento originado pela carlinga existente na secção de apoio, o que não se verifica na secção de meio vão. A inexistência de carlingas na secção de meio vão permite que as vigas se deformem e, consequentemente, diminuem os momentos negativos e aumentam os momentos positivos.

5.4 Análise na direção transversal utilizando superfícies de influência

5.4.1 Generalidades

Neste subcapítulo são comparados os resultados numéricos dos momentos transversais, obtidos no subcapítulo anterior, com os resultados obtidos com recurso a superfícies de influência. Como este estudo se debruça sobre tabuleiros de diferentes características, foi necessário considerar diferentes superfícies de influência. Assim, para o estudo de todos os casos abordados, dada a relevância que a variação de espessura tem na análise dos esforços, consideraram-se as superfícies de influência de HOMBERG, que têm em conta a variação de espessura da laje do tabuleiro.

Nos casos de estudos 3, 4 e 5, apesar de terem tabuleiros constituídos por vigas pré-fabricadas, as superfícies de influência de HOMBERG permitem considerar este tipo de tabuleiros, desde que a espessura da laje seja constante.

As superfícies de influência foram consideradas apenas para carregamentos pontuais ou lineares. Relativamente às sobrecargas distribuídas, os esforços foram obtidos com recurso ao programa de pórticos planos Ftool®.

Salienta-se ainda que só se efetuou a comparação entre os dois métodos para os modelos de sobrecargas condicionantes, tendo em conta os resultados obtidos no subcapítulo anterior.

5.4.2 Caso de estudo 1

5.4.2.1 Variante com 25,00 m de vão corrente

Nas tabelas 5.36 e 5.37 constam os momentos fletores máximos obtidos no tabuleiro do caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente, para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.36 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente, e diferença para os resultados numéricos na secção de meio vão.

	Secção de meio vão			Diferença		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (%)	m+ (%)	m _{consola} (%)
RSA	31,40	60,50	45,00	-1,8	18,5	-22,1
EC1	62,71	82,39	54,50	-8,3	22,0	-12,3
AASHTO	42,63	51,14	22,88	24,8	14,7	-28,1
SATCC	55,94	80,76	37,70	-8,6	13,8	-33,8
ABNT	30,79	59,12	37,25	16,6	35,4	-33,2

Vãos correntes de 25,00 m

Tabela 5.37 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente, e diferença para os resultados numéricos na secção de apoio.

	Secção de apoio			Diferença		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (%)	m+ (%)	m _{consola} (%)
RSA	85,00	46,00	65,00	67,5	-0,8	2,3
EC1	148,70	69,20	78,50	44,6	6,2	19,8
AASHTO	76,09	39,09	41,23	54,7	4,2	9,0
SATCC	93,76	67,81	50,90	38,3	-4,4	-16,7
ABNT	70,25	41,70	52,25	49,4	11,2	-21,5

Vãos correntes de 25,00 m

Nas figuras 5.43, 5.44 e 5.45 apresentam-se os valores das tabelas 5.15, 5.36 e 5.37 sob a forma gráfica.

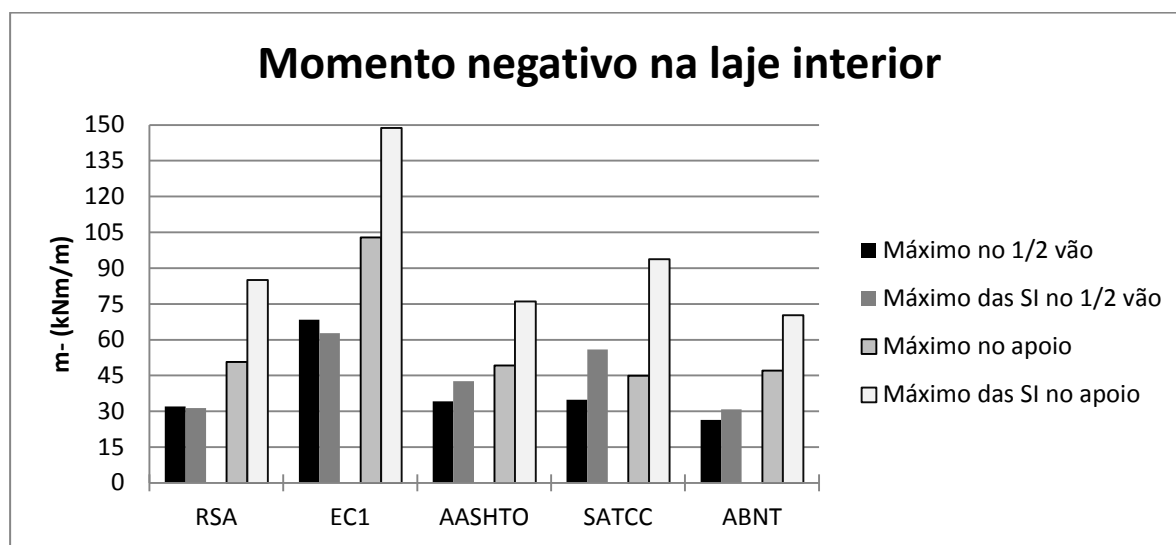


Figura 5.43 – Momentos negativos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.

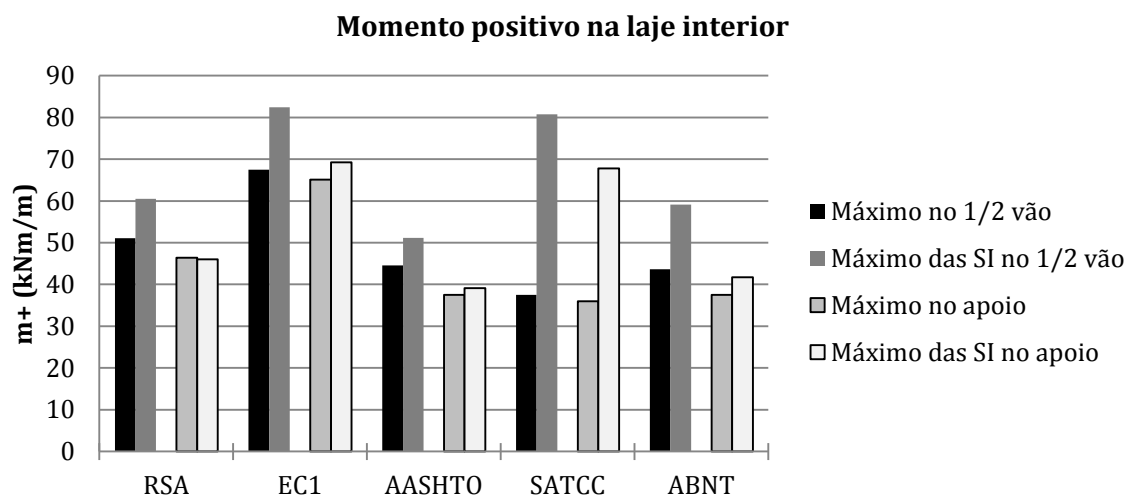


Figura 5.44 – Momentos positivos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.

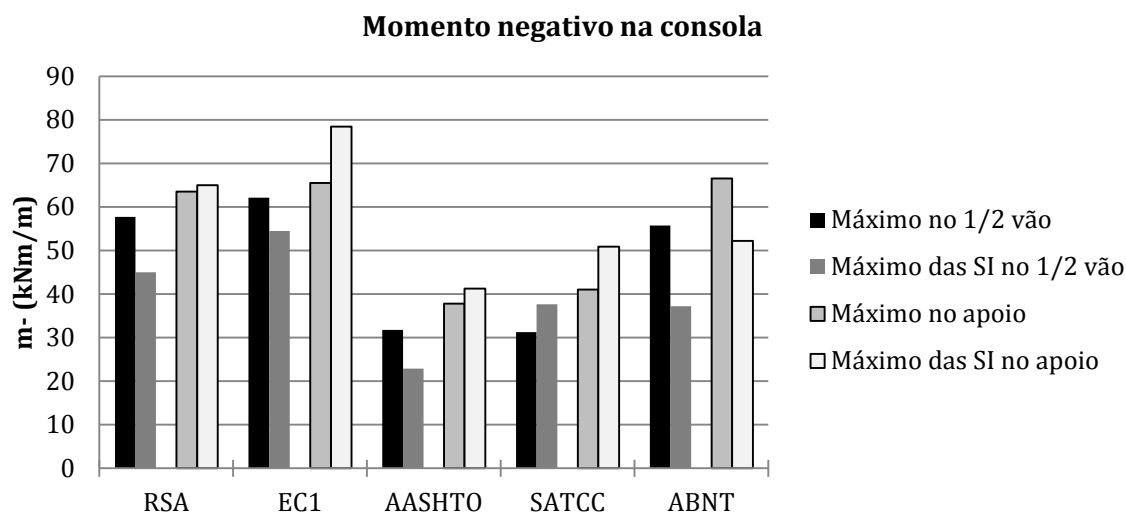


Figura 5.45 – Momentos negativos na laje em consola, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 1, na variante com 25,00 m de vão corrente.

Neste caso de estudo, em geral, as diferenças entre os resultados numéricos e os obtidos com as superfícies de influência apresentam diferenças pouco significativas. Porém, a diferença dos momentos negativos no interior da laje na secção de apoio, é considerável, visto que a superfície de influência considerada (página 47 de HOMBERG, 1972) não se ajusta ao encastramento existente na secção de apoio.

Relativamente ao momento negativo na consola, na secção de meio vão surgem diferenças significativas, nomeadamente nas normas norte-americana, sul-africana e brasileira, com variações na ordem de 28,1% a 33,2%.

5.4.2.2 Variante com 40,00 m de vão corrente

Nas tabelas 5.38 e 5.39 apresentam-se os esforços máximos obtidos no tabuleiro do caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente, para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.38 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente, e diferença para os resultados numéricos na secção de meio vão.

	Secção de meio vão			Diferença		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (%)	m+ (%)	m _{consola} (%)
RSA	31,40	60,50	45,00	-5,8	15,8	-25,1
EC1	60,59	80,37	54,50	-22,1	1,1	-26,6
AASHTO	41,45	49,97	22,88	22,4	4,6	-31,7
SATCC	50,65	78,94	37,70	-9,7	15,9	-34,8
ABNT	28,89	57,22	37,25	6,4	18,7	-33,4

Vão corrente de 40,00 m

Tabela 5.39 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente, e diferença para os resultados numéricos na secção de apoio.

	Secção de apoio			Diferença		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (%)	m+ (%)	m _{consola} (%)
RSA	85,00	46,00	65,00	69,0	-0,6	2,0
EC1	148,70	69,20	78,50	25,2	-1,2	-4,4
AASHTO	76,09	39,09	41,23	52,1	4,0	8,3
SATCC	95,23	63,02	50,90	21,4	11,5	-19,8
ABNT	70,25	41,70	52,25	42,6	11,7	-12,5

Vão corrente de 40,00 m

Nas figuras 5.46, 5.47 e 5.48 apresentam-se os valores das tabelas 5.18, 5.38 e 5.39 sob a forma gráfica.

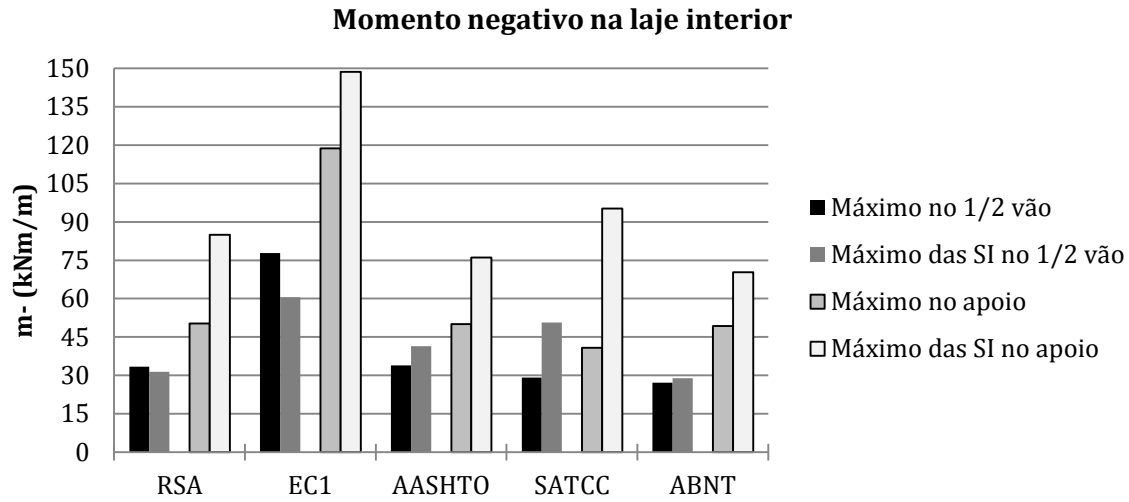


Figura 5.46 – Momentos negativos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.

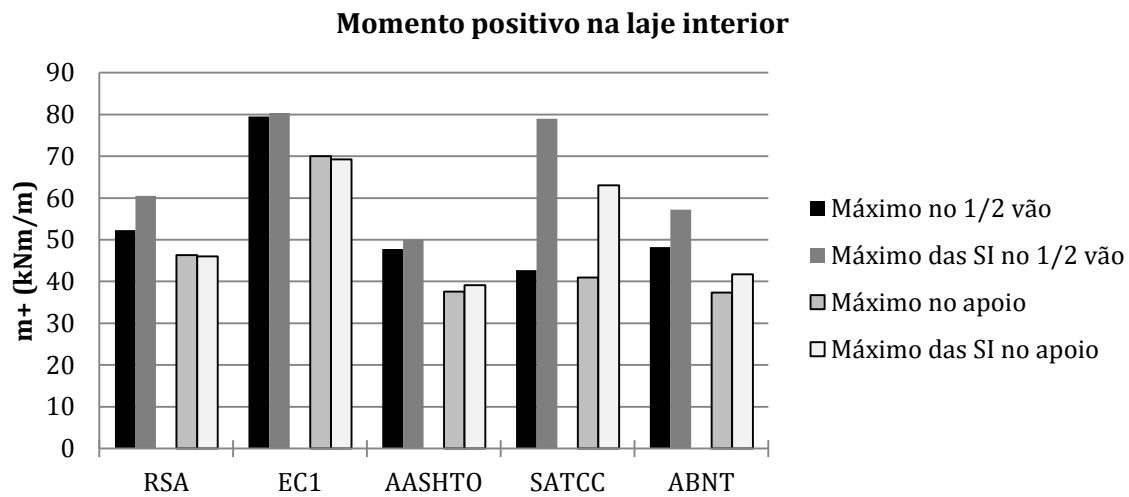


Figura 5.47 – Momentos positivos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.

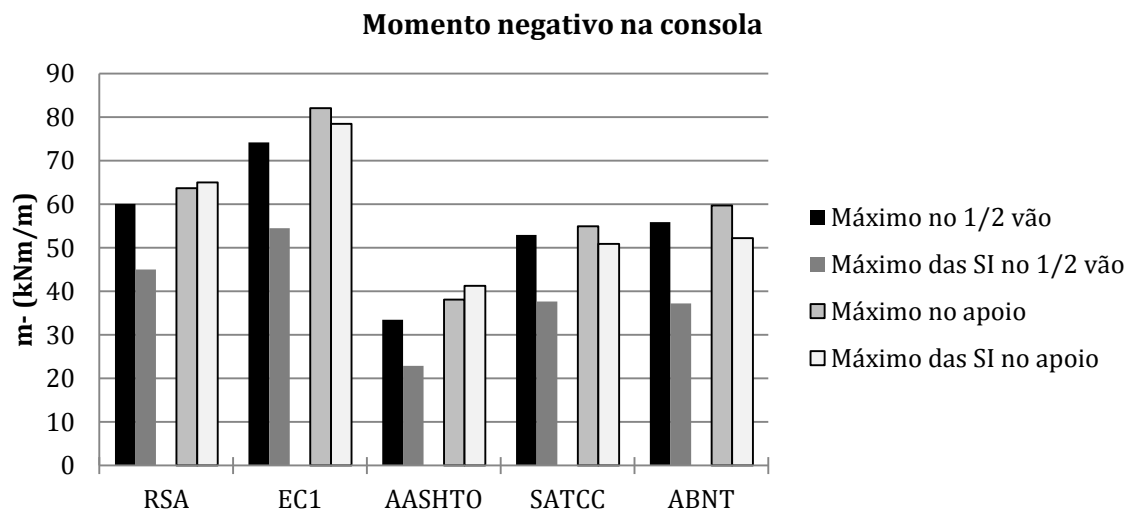


Figura 5.48 – Momentos negativos na laje em consola, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 1, na variante com 40,00 m de vão corrente.

Nesta segunda variante os modelos condicionantes são sensivelmente os mesmos da variante anterior, razão pela qual se verificaram as mesmas variações de resultados, ou seja, verificou-se novamente que os esforços obtidos por superfícies de influência são idênticos aos numéricos, exceto no momento negativo máximo da consola, na secção de meio vão, e no momento negativo máximo da laje interior, na secção de apoio.

Dado o estudo de duas variantes no comprimento dos vãos de tabuleiros com secções transversais semelhantes, pode-se concluir que, para o tabuleiro de 11,00 m de largura, as superfícies de influência utilizadas no cálculo dos momentos negativos na consola, na secção de apoio, os momentos negativos da laje interior, a meio vão, e os momentos positivos na laje, em ambas as secções, apresentam boas aproximações aos resultados obtidos pelos modelos numéricos. No entanto, os resultados obtidos para o momento negativo, na laje interior, por superfícies de influência, são extremamente conservativos. Apesar de não ser aconselhável, podem considerar-se os resultados visto que estão do lado da segurança. No caso do momento na consola, a meio vão, o mesmo não se verifica, ou seja, os resultados obtidos por superfícies de influência são sempre inferiores aos obtidos numericamente. Assim, estas superfícies de influência são pouco aconselháveis para utilizar no dimensionamento de tabuleiros deste tipo.

5.4.3 Caso de estudo 2

5.4.3.1 Variante com 25,00 m de vão corrente

Nas tabelas 5.40 e 5.41 apresentam-se os esforços máximos obtidos no tabuleiro do caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente, para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.40 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente, e diferença para os resultados numéricos na secção de meio vão.

	Secção de meio vão			Diferença		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (%)	m+ (%)	m _{consola} (%)
RSA	45,40	79,50	71,00	-6,14	19,23	-0,34
EC1	89,17	116,24	93,35	5,36	19,75	-0,17
AASHTO	40,41	62,49	39,72	-18,24	17,05	-14,40
SATCC	57,87	89,33	80,55	-2,13	14,73	-7,97
ABNT	48,41	80,99	68,35	13,70	35,13	1,80

Tabela 5.41 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente, e diferença para os resultados numéricos na secção de apoio.

	Secção de apoio			Diferença		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (%)	m+ (%)	m _{consola} (%)
RSA	132,30	53,00	95,00	103,54	-13,96	14,96
EC1	199,75	85,50	133,85	71,84	-1,47	12,06
AASHTO	94,66	39,85	53,40	52,09	-13,76	-5,27
SATCC	150,30	57,42	99,68	65,80	-14,81	-2,40
ABNT	123,13	51,75	86,35	89,80	-2,30	-6,86

Nas figuras 5.49, 5.50 e 5.51 apresentam-se os valores das tabelas 5.21, 5.40 e 5.41 sob a forma gráfica.

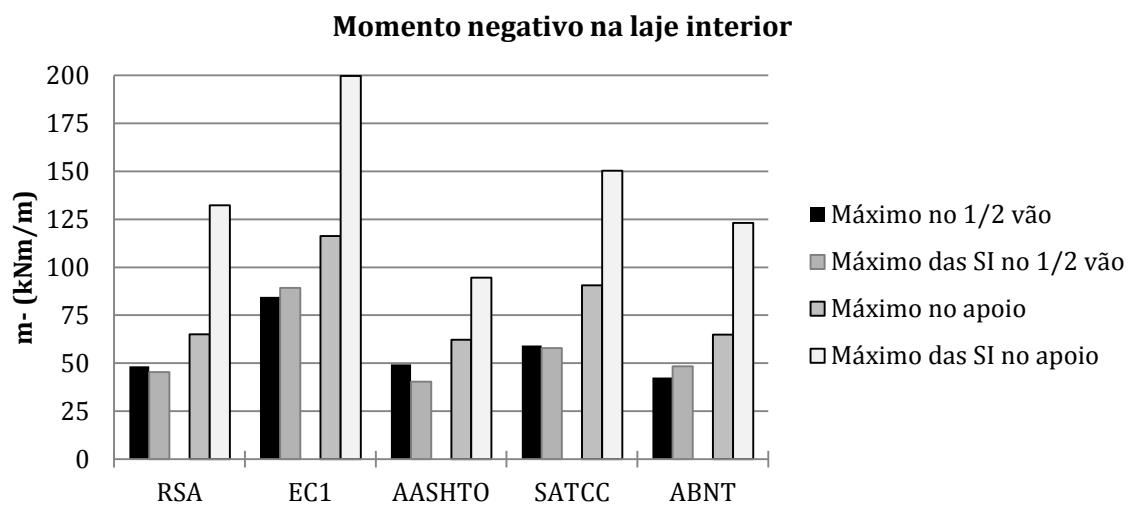


Figura 5.49 – Momentos negativos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.

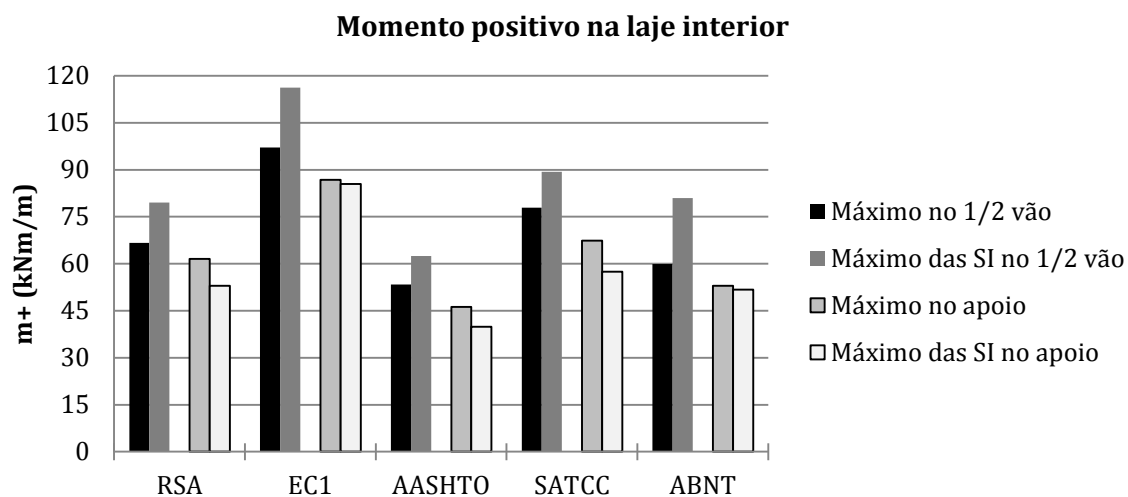


Figura 5.50 – Momentos positivos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.

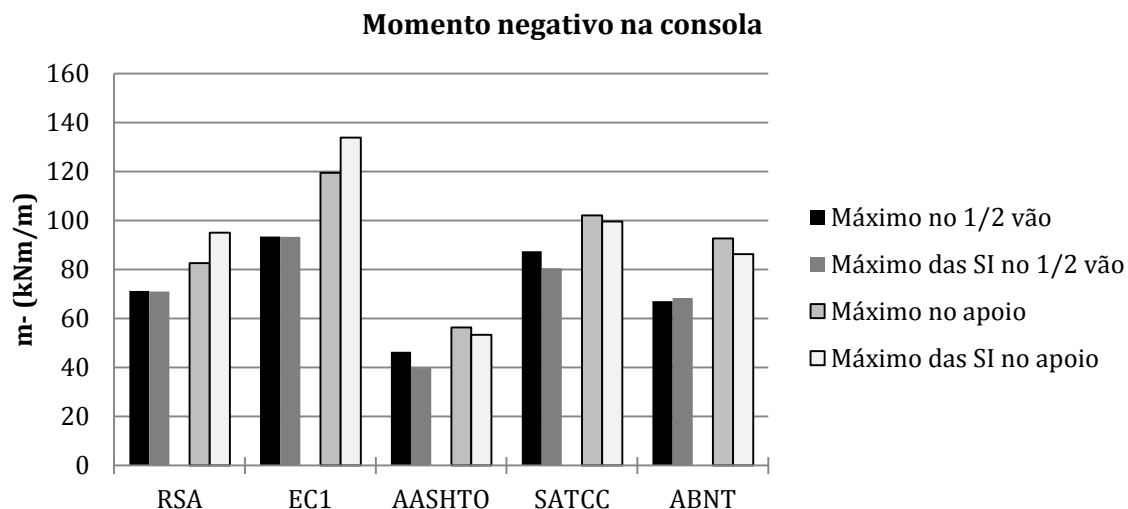


Figura 5.51 – Momentos negativos na consola, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 2, na variante com 25,00 m de vão corrente.

Tal como no caso de estudo anterior, na variante de 25,00 m de vão corrente ocorrem diferenças elevadas no momento negativo no interior da laje, na secção de meio vão. Essas diferenças justificam-se, mais uma vez, pela diferença do grau de encastramento considerado pelas superfícies de influência e pelo modelo numérico. Contudo, o alargamento do tabuleiro permite uma melhor adaptação da superfície de influência ao tabuleiro estudado, apresentando por isso resultados mais próximos relativamente aos momentos na consola.

Em geral, para a variante analisada, a aproximação dos resultados obtidos através das superfícies de influência aos resultados do modelo numérico é razoável.

5.4.3.2 Variante com 40,00 m de vão corrente

Nas tabelas 5.42 e 5.43 apresentam-se os esforços máximos obtidos no tabuleiro do caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente, para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.42 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente, e diferença para os resultados numéricos na secção de meio vão.

	Secção de meio vão			Diferença		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (%)	m+ (%)	m _{consola} (%)
RSA	45,40	79,50	71,00	-6,60	17,57	-8,14
EC1	85,95	115,00	93,35	-3,43	8,43	-0,43
AASHTO	38,54	60,81	39,72	-17,07	5,64	-17,34
SATCC	57,87	89,33	80,55	2,83	9,83	-11,01
ABNT	45,14	77,72	68,35	13,42	18,04	-0,94

Vão corrente de 40,00 m

Tabela 5.43 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente, e diferença para os resultados numéricos na secção de apoio.

	Secção de apoio			Diferença		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (%)	m+ (%)	m _{consola} (%)
RSA	132,30	53,00	95,00	116,71	-12,89	6,83
EC1	199,75	85,50	133,85	73,68	-4,53	13,68
AASHTO	83,42	34,69	52,79	41,61	-16,87	-2,80
SATCC	150,30	57,42	99,68	76,62	-12,52	-1,43
ABNT	123,13	51,75	86,35	85,07	6,75	-4,14

Vão corrente de 40,00 m

Nas figuras 5.52, 5.53 e 5.54 apresentam-se os valores das tabelas 5.24, 5.42 e 5.43 sob a forma gráfica.

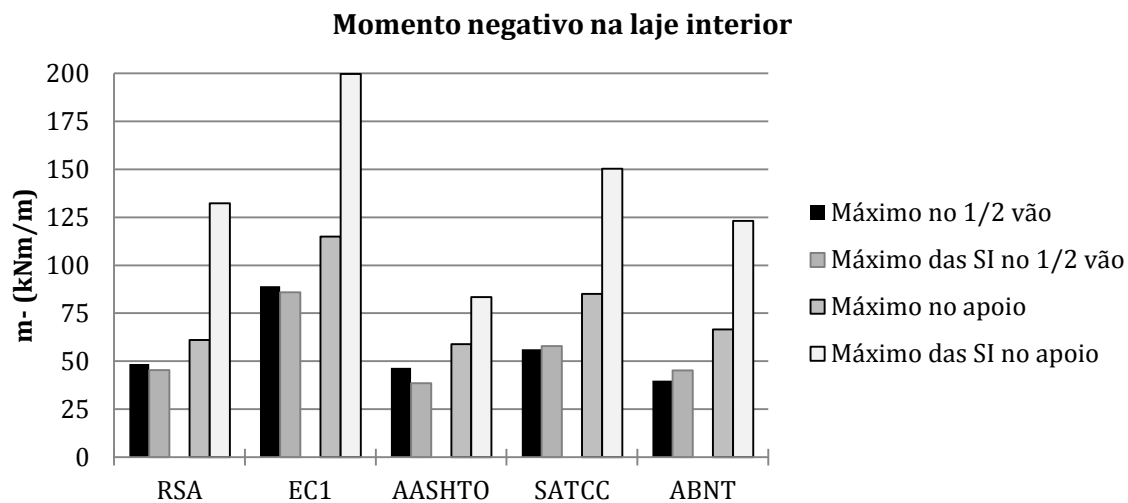


Figura 5.52 – Momentos negativos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.

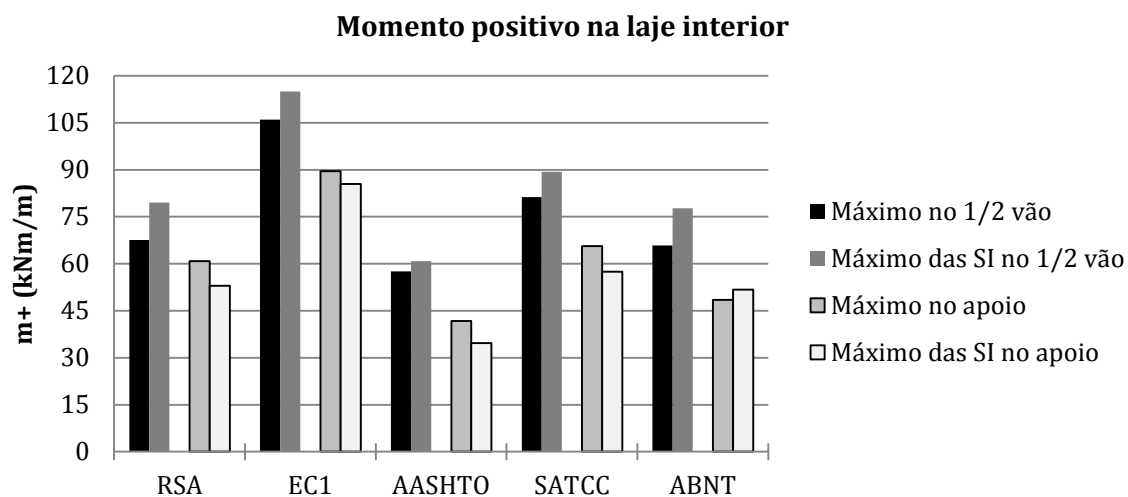


Figura 5.53 – Momentos positivos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.

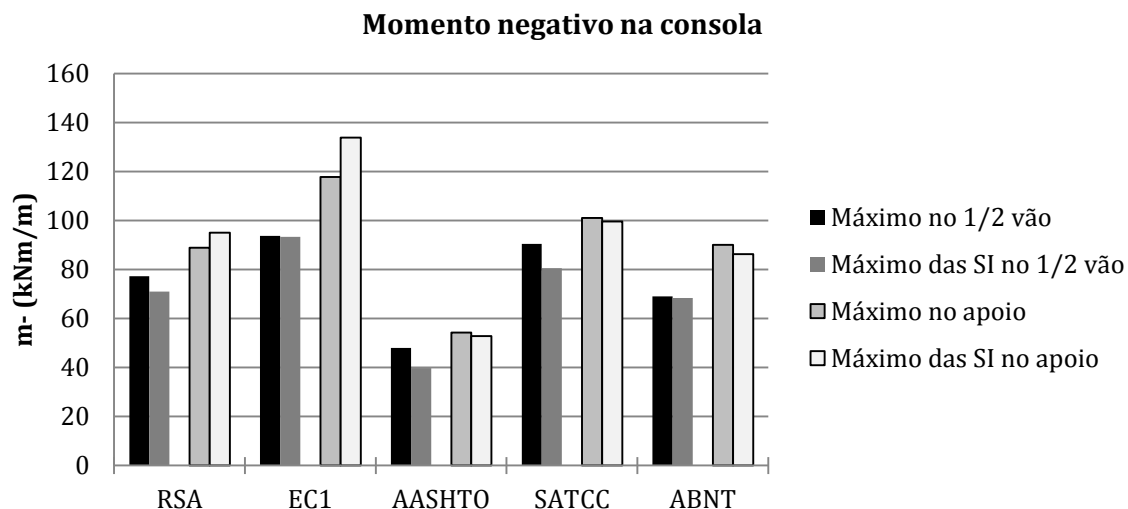


Figura 5.54 – Momentos negativos na consola, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 2, na variante com 40,00 m de vão corrente.

Na variante de 40,00 m verificaram-se variações percentuais semelhantes às do caso de 25,00 m, correspondendo as maiores diferenças ao momento negativo máximo da laje interior, na secção de apoio. No entanto, a diferença percentual do momento positivo da ABNT verificada na variante anterior, a meio vão, reduz-se nesta situação. Tal deve-se ao aumento do comprimento do vão, que não é tido em conta nas superfícies de influência. Este comportamento também afeta as restantes normas, contudo não é suficiente para originar diferenças significativas entre os métodos.

Através do estudo das duas variantes no comprimento dos vãos de um tabuleiro de largura de 15,00 m, verificou-se que as superfícies de influência utilizadas para calcular os momentos negativos no interior da laje geram diferenças muito elevadas, não sendo por isso aconselhável a sua utilização. Contudo, em ambos os casos verificou-se que os resultados obtidos por superfícies de influência estão sempre do lado da segurança face aos resultados do método numérico.

5.4.4 Caso de estudo 3

Nas tabelas 5.44 e 5.45 apresentam-se os esforços máximos obtidos no tabuleiro do caso de estudo 3, para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.44 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 3, e diferença para os resultados numéricos na secção de meio vão.

	Secção de meio vão			Diferença		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (%)	m+ (%)	m _{consola} (%)
RSA	20,30	30,00	66,37	-52,92	9,81	58,06
EC1	37,60	50,00	92,90	-36,31	3,97	53,33
AASHTO	17,52	25,28	45,80	-52,97	-4,12	53,33
SATCC	21,21	30,00	46,47	-41,89	19,47	26,62
ABNT	16,13	25,60	53,19	-55,63	11,16	50,46

Vão corrente de 30,00 m

Tabela 5.45 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 3, e diferença para os resultados numéricos na secção de apoio.

	Secção de apoio			Diferença		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (%)	m+ (%)	m _{consola} (%)
RSA	30,40	23,00	66,37	-39,09	9,84	45,93
EC1	44,25	40,00	92,94	-38,55	-11,17	48,56
AASHTO	29,61	19,54	45,80	-36,55	-11,66	37,66
SATCC	27,68	24,00	46,47	-30,52	16,22	16,20
ABNT	25,20	18,45	53,19	-45,77	21,54	28,63

Vão corrente de 30,00 m

Nas figuras 5.55, 5.56 e 5.57 apresentam-se os valores das tabelas 5.27, 5.44 e 5.45 sob a forma gráfica.

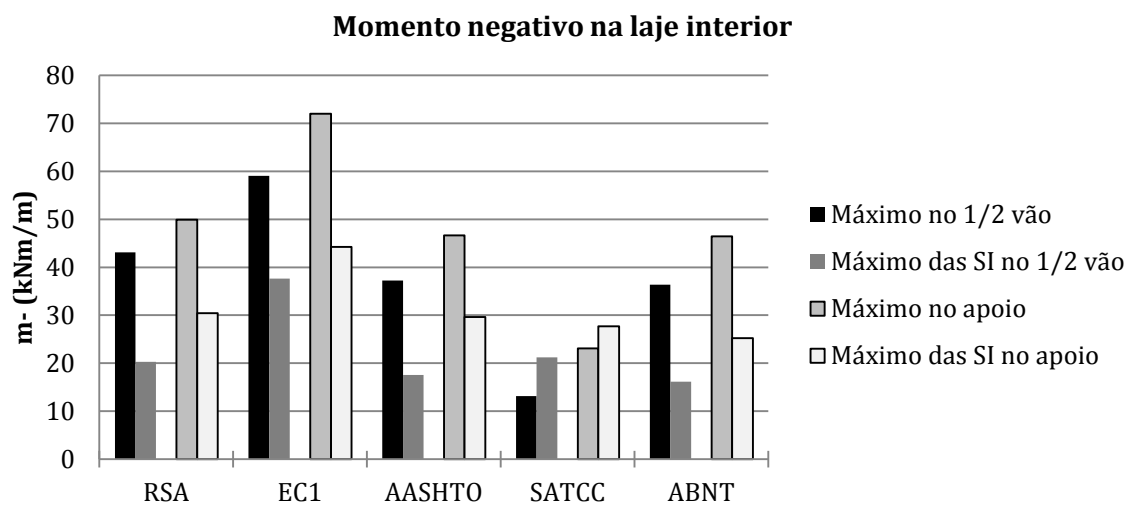


Figura 5.55 – Momentos negativos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 3.

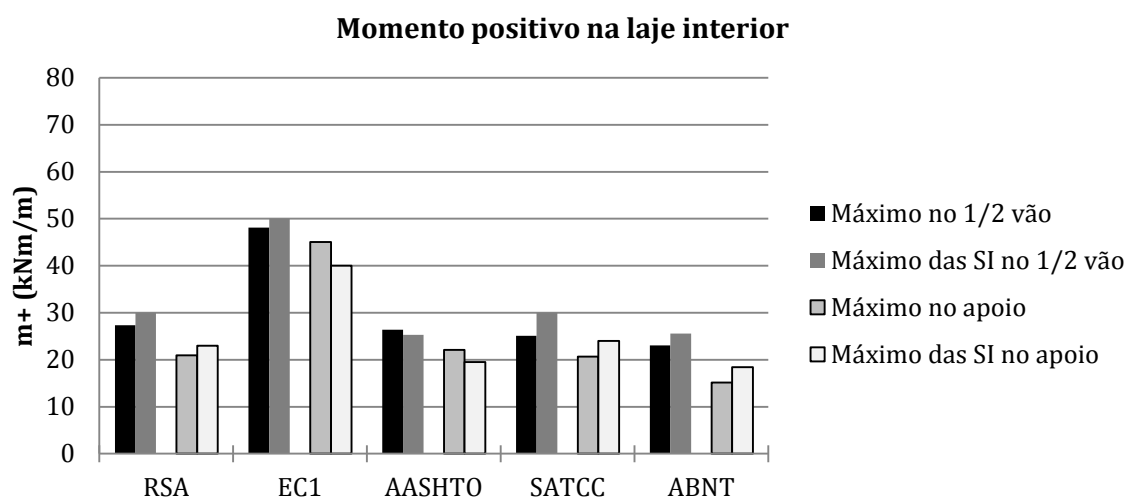


Figura 5.56 – Momentos positivos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 3.

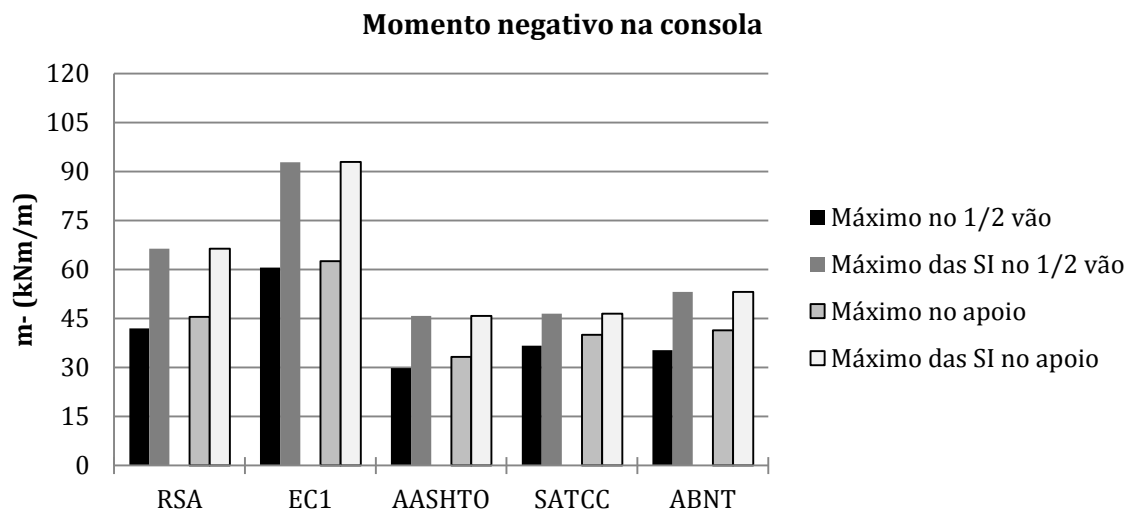


Figura 5.57 – Momentos negativos na consola, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 3.

Das tabelas 5.42 e 5.43 verifica-se que os dois métodos têm resultados idênticos para o momento fletor positivo, tanto na secção de apoio como na secção de meio vão. Relativamente aos resultados obtidos nos momentos flectores negativos, na laje interior e na consola, os dois métodos apresentam diferenças consideráveis.

Assim, conclui-se que ao determinar os momentos negativos por superfícies de influência, para este tipo de tabuleiros, podem surgir erros significativos. Por essa razão é indispensável a elaboração de um modelo de elementos finitos para obter resultados fiáveis para os momentos negativos.

5.4.5 Caso de estudo 4

Nas tabelas 5.46 e 5.47 apresentam-se os esforços máximos obtidos no tabuleiro do caso de estudo 4, para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.46 – Momentos flectores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 4, e diferença para os resultados numéricos na secção de meio vão.

	Secção de meio vão			Diferença		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (%)	m+ (%)	m _{consola} (%)
RSA	20,30	30,00	66,37	204,35	12,36	83,95
EC1	35,00	50,00	92,95	181,80	7,18	65,36
AASHTO	15,71	21,67	38,96	87,47	7,33	60,79
SATCC	21,18	29,00	46,37	200,85	21,19	34,02
ABNT	17,61	25,48	52,76	366,98	19,88	71,35

14.00
Largura considerada para a faixa de rodagem

Vão corrente de 30,00 m

Tabela 5.47 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 4, e diferença para os resultados numéricos na secção de apoio.

	Secção de apoio			Diferença		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (%)	m+ (%)	m _{consola} (%)
RSA	30,40	23,00	66,37	61,44	15,17	70,22
EC1	50,00	40,00	92,95	42,25	-8,57	62,44
AASHTO	26,01	16,71	38,96	41,82	-7,78	54,66
SATCC	27,63	24,00	46,47	63,20	21,83	30,53
ABNT	26,37	20,00	52,75	51,03	-22,30	67,42

14,00

Largura considerada para a faixa de rodagem

Vão corrente de 30,00 m

Nas figuras 5.58, 5.59 e 5.60 apresentam-se os valores das tabelas 5.30, 5.46 e 5.47 sob a forma gráfica.

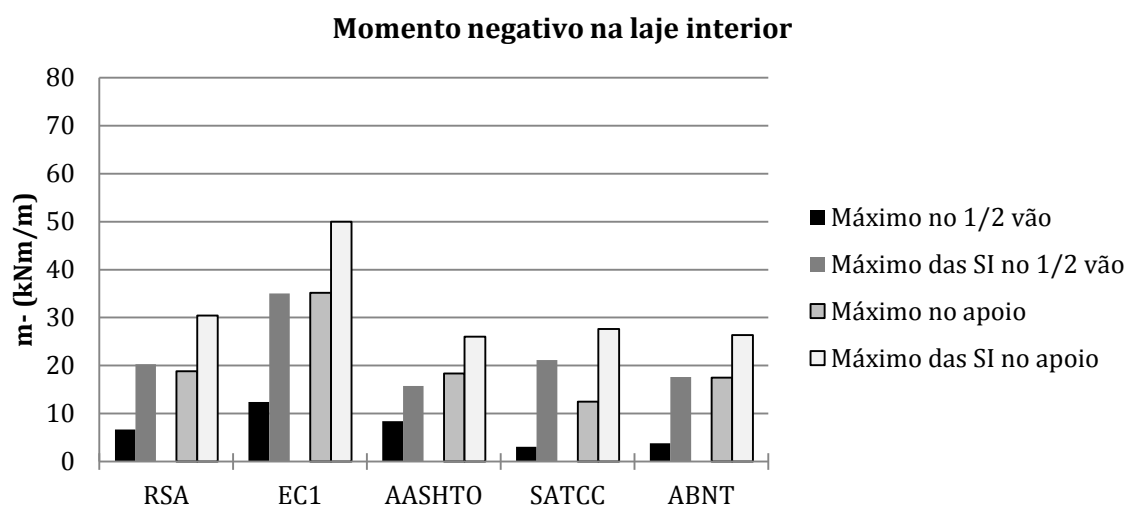


Figura 5.58 – Momentos negativos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 4.

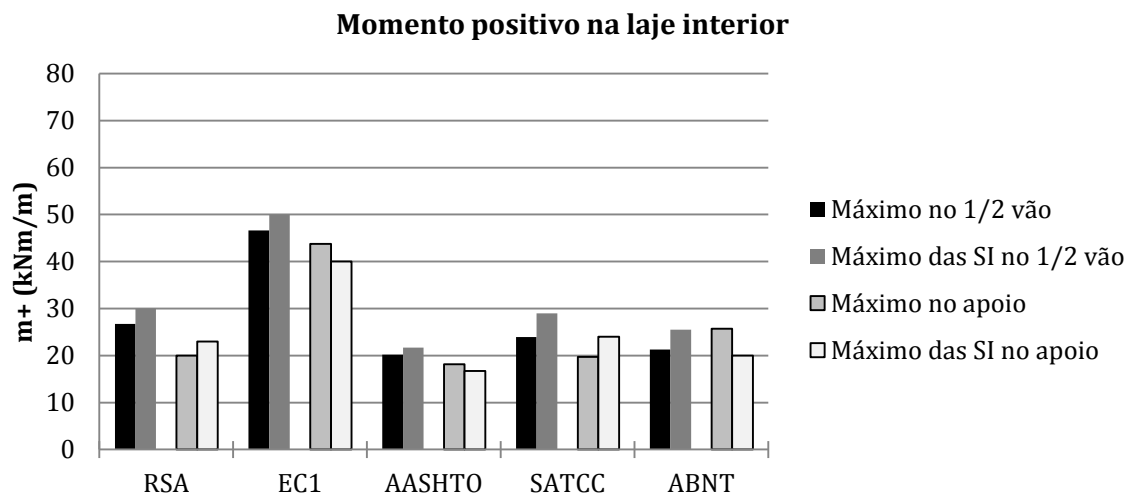


Figura 5.59 – Momentos positivos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 4.

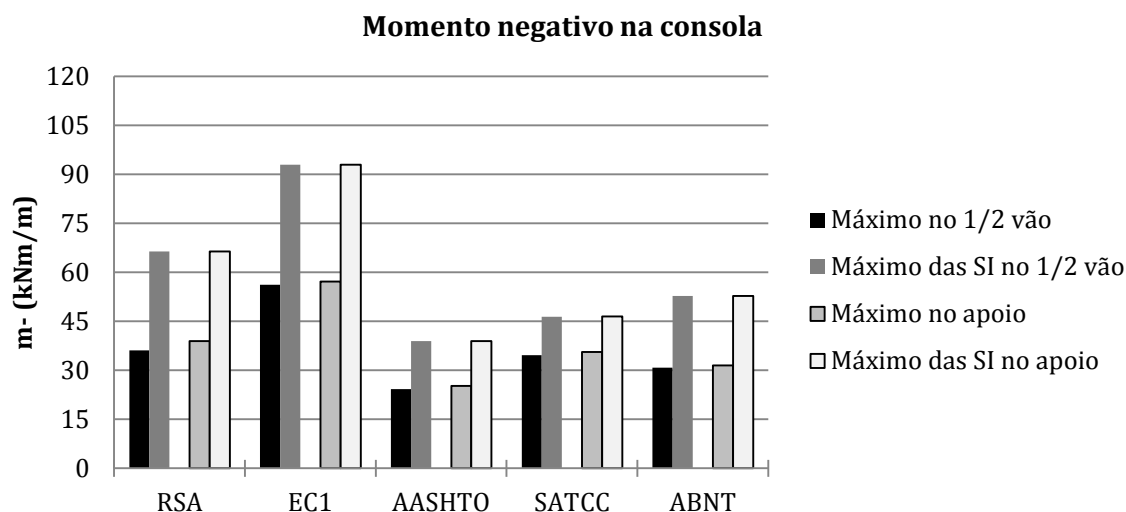


Figura 5.60 – Momentos negativos na consola, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 4.

Tal como o caso anterior, as maiores diferenças percentuais ocorrem para os mesmos modelos de sobrecargas. No entanto, neste caso verifica-se um aumento da variação no que respeita aos momentos negativos. Neste tabuleiro, composto por 7 vigas pré-fabricadas, foi possível verificar uma maior deformação do tabuleiro. O aumento dessa deformação originou a redução do momento negativo, dispersando esse esforço pela laje e pelas vigas adjacentes. Visto que as superfícies de influência não têm em consideração este facto, apresentam valores maiores do que o modelo numérico.

Para os momentos positivos a diferença é bastante menor, pelo que se pode aferir que o uso de superfícies de influência é adequado para o cálculo deste tipo de esforço.

5.4.6 Caso de estudo 5

Nas tabelas 5.48 e 5.49 apresentam-se os esforços máximos obtidos no tabuleiro do caso de estudo 5, para as cinco normas consideradas.

Tabela 5.48 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 5, e diferença para os resultados numéricos na secção de meio vão.

	Secção de meio vão			Diferença		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (%)	m+ (%)	m _{consola} (%)
RSA	22,11	35,00	102,20	-16,60	16,47	44,31
EC1	50,00	60,00	118,94	27,23	4,49	59,54
AASHTO	21,27	23,74	42,46	24,68	-17,94	54,62
SATCC	51,75	46,50	99,12	161,76	-3,85	44,17
ABNT	28,58	36,37	89,15	93,37	21,84	58,91

Vão corrente de 30,00 m

Tabela 5.49 – Momentos fletores obtidos a partir das superfícies de influência para o caso de estudo 5, e diferença para os resultados numéricos na secção de apoio.

	Secção de apoio			Diferença		
	m- (kNm/m)	m+ (kNm/m)	m _{consola} (kNm/m)	m- (%)	m+ (%)	m _{consola} (%)
RSA	39,78	29,00	102,20	2,76	19,29	33,96
EC1	75,00	50,00	118,94	34,82	-8,58	34,78
AASHTO	33,31	18,25	42,46	-7,19	-22,14	38,40
SATCC	56,93	29,75	99,12	-4,40	-23,13	41,40
ABNT	56,01	25,32	89,15	40,48	-0,59	42,00

Vão corrente de 30,00 m

Nas figuras 5.61, 5.62 e 5.63 apresentam-se os valores das tabelas 5.33, 5.48 e 5.49 sob a forma gráfica.

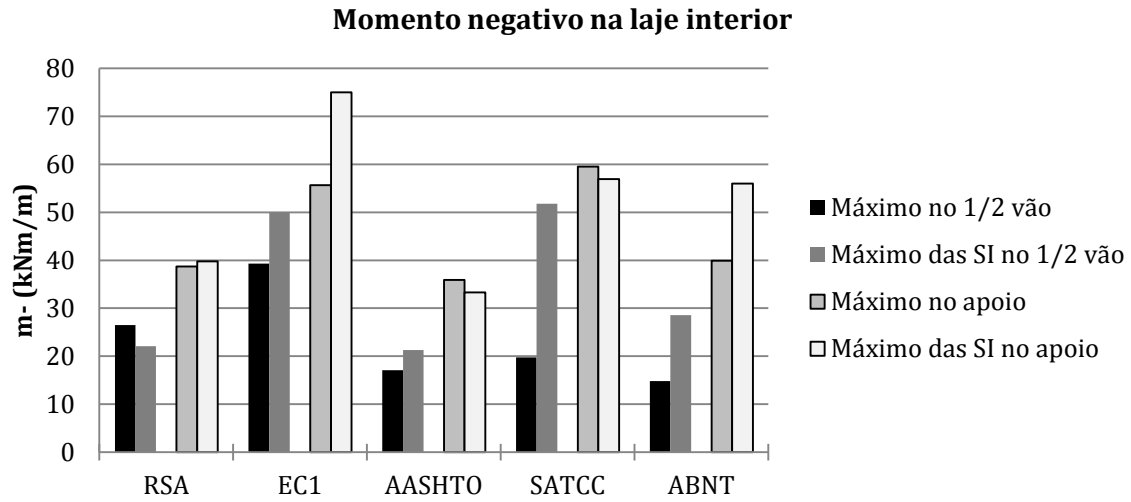


Figura 5.61 – Momentos negativos na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 5.

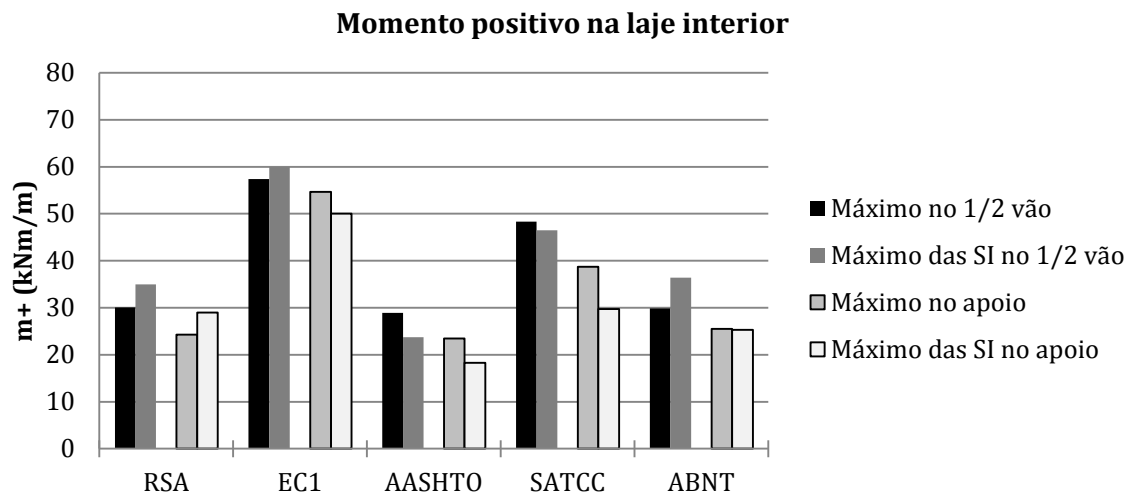


Figura 5.62 – Momentos positivo na laje interior, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 5.

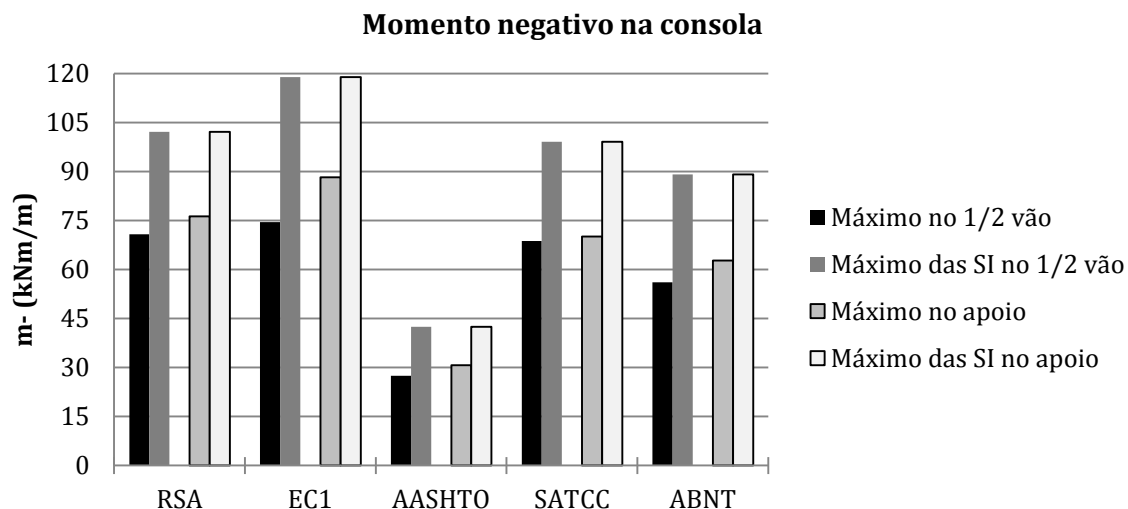


Figura 5.63 – Momentos negativos na consola, determinados pelo método dos elementos finitos e por superfícies de influência, para o caso de estudo 5.

Tal como nos casos de estudo 3 e 4, relativos a tabuleiros com vigas pré-fabricadas, as diferenças dos momentos fletores positivos são pequenas. Contudo, as vigas consideradas neste modelo são mais robustas, impondo por isso um maior grau de encastramento à laje, o que faz aproximar os resultados entre os dois métodos. Apesar de ocorrer esta aproximação, ainda se verificam diferenças significativas entre os dois métodos, tornando indispensável a utilização do modelo de elementos finitos para uma maior acuidade dos resultados.

5.4.7 Considerações finais

Em geral, para os tabuleiros betonados *in-situ*, verifica-se uma boa aproximação entre o método numérico e os valores obtidos com as superfícies de influência, à exceção dos momentos negativos no interior da laje, na secção de apoio, em que todas as variantes apresentam diferenças muito elevadas, porém sempre do lado da segurança. É também de referir que, pontualmente, surgem valores com diferenças significativas. Tal foi verificado nas variantes de 25,00 m, porque as vigas sofrem menores rotações, implicando um afastamento dos valores dos dois métodos.

Nos tabuleiros constituídos por vigas pré-fabricadas, apenas os momentos positivos no interior da laje apresentam resultados próximos entre os dois métodos, enquanto que para os momentos negativos na laje e na consola, essas diferenças são elevadas. Estas diferenças ocorrem devido ao comportamento deste tipo de estruturas, que ao sofrerem maior deformação alteram significativamente os resultados dos esforços, principalmente dos momentos negativos.

O comportamento estrutural altera-se significativamente de estrutura para estrutura. Assim, nos tabuleiros de vigas pré-fabricadas deve proceder-se à elaboração de modelos de elementos finitos, de forma a obter esforços mais próximos da realidade.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 Enquadramento da dissertação

A previsível alteração do regulamento de estruturas vigente em Portugal e o aumento da necessidade da engenharia de pontes portuguesa aplicar as normas de outros países, devido à necessidade de integrar mercados internacionais, motivou a realização deste estudo. Foram abordadas cinco normas de estruturas, nomeadamente o RSA, o regulamento atualmente em vigor, e o EC1, a norma que irá entrar em vigor em Portugal. Estudaram-se também a norma norte-americana, a norma sul-africana e a norma brasileira por serem as normas internacionais mais utilizadas pelo meio técnico nacional, cujos modelos de sobrecargas rodoviárias foram detalhadamente apresentados no capítulo 3.

O estudo comparativo das cinco normas debruçou-se na análise de cinco tabuleiros vigados. As suas características geométricas permitiram estudar pormenorizadamente a influência dos diferentes sistemas de sobrecargas das cinco normas e comparar percentualmente os seus efeitos estruturais.

Com o objetivo de auxiliar o estudo comparativo e obter uma perceção da investigação já realizada no âmbito deste tema, identificaram-se um conjunto de trabalhos similares já realizados, tanto a nível nacional como internacional.

Selecionaram-se 5 estudos comparativos que foram apresentados em detalhe no capítulo 2. Enquadrou-se inicialmente o relatório do LNEC, desenvolvido pelo Eng^o Abel Mascarenhas, que se trata de um estudo comparativo entre normas de estruturas que se encontravam em vigor na década de 70. Compararam-se os efeitos estruturais, na direção longitudinal, num tabuleiro bi-apoiado de comprimento e largura variável. Concluiu-se que para vãos superiores a 25,00 m, os modelos de sobrecargas uniformes tornam-se condicionantes em relação aos modelos de sobrecargas pontuais, reforçando a ideia de que o aumento do vão e o alargamento do tabuleiro são fatores que influenciam os valores dos esforços.

Mais recentemente, em Portugal, foram desenvolvidas três teses de Mestrado que comparam os esforços rodoviários. Duas dessas teses, desenvolvidas na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), realizaram um estudo idêntico, tendo abordado uma análise longitudinal de tabuleiros bi-apoiados com vão variável até 60,00 m. A tese de Mestrado desenvolvida no Instituto Superior Técnico (IST) abrange um maior número de situações, visto que foram estudados tabuleiros com um diverso número de vãos, o que permitiu avaliar os momentos fletores positivo e negativo, além do esforço transversal. Adicionalmente foi realizada uma análise transversal dos esforços, onde foram estudados os esforços de membrana na laje a meio vão, na laje em apoio e na consola. Esta análise e a análise longitudinal realizada foram efetuadas em obras de arte nervuradas e vigadas, aproximando-se de certo modo ao caso de obras de arte reais.

Os dois trabalhos elaborados por O'Brien *et al* comparam as normas existentes com o tráfego atual/o tráfego futuro estimado. Num estudo, os autores comparam os efeitos estruturais do tráfego rodoviário de diferentes zonas da Europa com os efeitos estruturais induzidos pelo EC1. Com base na estimativa da diferença entre os esforços provocados pelo EC1 e o tráfego real e a importância da ponte no tráfego local, indicar se a ponte necessita de um reforço estrutural ou simplesmente limitar o tráfego rodoviário. Noutro estudo semelhante, os mesmos autores pretendem avaliar os efeitos estruturais provocados pelo aumento do peso e do volume dos veículos especiais. Concluiu-se que, cumprindo certas condições, o aumento do peso e/ou da quantidade dos veículos especiais não provoca um aumento dos esforços máximos obtidos quando se consideram as normas em vigor. Relativamente ao estudo finlandês, que comparou as diferenças entre as normas europeia e russa, bem como os respetivos efeitos estruturais, foi evidenciada a semelhança dos esforços máximos entre as normas para o estudo de um tabuleiro bi-apoiado.

Em suma, os estudos nacionais abordados evidenciam que a norma europeia produz sempre esforços mais gravosos que o regulamento português. Porém, não foram considerados os fatores de correção definidos no Anexo Nacional do EC1, o que reduz as intensidades das forças que constituem os modelos da norma europeia. Os estudos internacionais, da autoria de O'Brien *et al*, evidenciam que a consideração de veículos especiais de maior porte não agrava os esforços máximos e, caso uma ponte não apresenta segurança após a alteração de normas, deve-se condicionar o tráfego. No outro estudo procede-se a uma breve comparação entre o EC1 e as normas russas, resultando numa proximidade entre os resultados obtidos das normas. No entanto foram abordados poucos casos de estudo, sendo necessário analisar mais situações para consolidar essas conclusões.

6.2 Escolha dos casos de estudo

Selecionaram-se 5 casos de estudo com o objetivo de estudar os efeitos estruturais em tabuleiros vigados e numa gama de vãos relativamente extensa. Foram realizadas duas análises dos esforços, na direção longitudinal e na direção transversal. Longitudinalmente estudaram-se os momentos fletores máximos e o esforço transversal máximo nas vigas. Transversalmente analisaram-se os momentos fletores máximos positivo e negativo nas lajes interiores e o momento fletor máximo negativo na laje em consola.

Os casos de estudo 1 e 2 abrangem tabuleiros constituídos por vigas betonadas *in-situ*. Cada caso apresenta duas variantes diferentes do comprimento dos vãos do tabuleiro (25,00 m e 40,00 m). Os casos de estudo 3, 4 e 5 destinam-se ao estudo de tabuleiros compostos por vigas pré-fabricadas. O terceiro caso de estudo resume-se a um tabuleiro estreito composto por três vigas, com objetivo de analisar pontes inseridas em caminhos rurais. A geometria do caso de estudo 4 é similar à do caso de estudo 3, nomeadamente no espaçamento entre vigas e na largura da consola, diferenciando-se apenas no número de vigas e largura do tabuleiro. Esse caso de estudo pretende simular um tipo de viaduto curto, utilizado em estradas nacionais. Por último estudou-se um tabuleiro largo composto por 4 vigas com o objetivo de se analisar o tipo de estruturas mais utilizadas em estradas nacionais ou vias rápidas, com vãos mais compridos.

Esta seleção de casos de estudo permitiu estudar os esforços máximos longitudinais e transversais, produzidos pelas sobrecargas das cinco normas abordadas, numa gama de pontes vigadas muito utilizadas pela engenharia portuguesa.

6.3 Resultados obtidos na análise longitudinal

A conclusão unânime entre os três estudos nacionais referidos no capítulo 2, de que o EC1 é sempre mais gravoso do que o RSA, é corroborada pelos resultados obtidos. Porém, o regulamento português,

no caso de estudo 3, gera um esforço transversal superior ao da norma europeia. Esta ocorrência deve-se ao facto de se ter desprezado o passeio neste caso de estudo, o que fez com que o esforço causado pelo veículo tipo do RSA ultrapassasse o esforço do EC1 (LM2). Também no CE4, pelas mesmas razões referidas, verificou-se uma aproximação muito grande entre o RSA e o EC1, diferenciando-se apenas 6% ao nível do esforço transversal. Relativamente ao CE5, apesar de também ter sido ignorada a presença dos passeios, os valores do RSA e do EC1, ao nível do esforço transversal, não são semelhantes, pois neste caso a largura de influência da viga exterior aumenta consideravelmente e o LM1 passa a ser o carregamento condicionante da norma europeia. Aliás, o modelo da sobrecarga uniforme com linear do RSA gera um esforço muito próximo do efeito gerado pelo veículo tipo do RSA, salientando a perda de preponderância do veículo tipo neste caso.

A principal conclusão referida no relatório do LNEC também é comprovada pelos resultados obtidos no presente estudo. Em tabuleiros mais estreitos e de menor vão, os modelos constituídos por cargas pontuais são condicionantes, enquanto que em tabuleiros mais largos e vãos mais compridos, as sobrecargas uniformes tendem a produzir esforços de maior valor. Efetivamente, no caso de estudo 1, na variante de 25,00 m, os esforços produzidos pelo veículo tipo são superiores aos esforços gerados pelas sobrecargas uniforme e linear mas, com o aumento do vão para 40,00 m ou o alargamento do tabuleiro para 15,00 m, o veículo tipo deixa de ser o modelo condicionante, tornando-se as sobrecargas uniforme e linear o modelo mais desfavorável. No entanto, nos casos de estudo 3, 4 e 5, o veículo tipo é sempre o modelo condicionante do RSA, visto que nesses tabuleiros a viga exterior absorve praticamente todos os esforços provocados por esse modelo.

Nos casos de estudo 1 e 2, o EC1 e a ABNT são, alternadamente, as normas mais condicionantes de todas as situações estudadas. Porém, no segundo caso de estudo, verifica-se um decréscimo da relação percentual da norma brasileira (cerca de 20%) com o RSA em relação ao primeiro caso. Visto que a ABNT considera uma sobrecarga uniforme no passeio, ao contrário das restantes normas, os esforços produzidos pela norma brasileira tendem a ser os mais elevados. Porém, no caso de estudo 2, a relação entre a largura do passeio e a largura das faixas de rodagem é muito menor que no primeiro caso, ocorrendo por isso uma aproximação dos valores dos esforços da ABNT aos do RSA.

Ainda no caso dos tabuleiros de vigas betonadas *in situ*, verifica-se que a AASHTO e o RSA são as normas menos gravosas, com diferenças máximas, entre si, de aproximadamente 15%, exceto no momento negativo do caso de estudo 1, na variante de 25,00m, em que a diferença de valores das duas normas é de 45% devido ao modelo especial considerado na AASHTO. Porém, o alargamento do tabuleiro para 15,00 m, no caso de estudo 2, gera uma aproximação dos valores do momento negativo do RSA e da AASHTO, passando a diferença a ser de 15%. Assim, com o aumento do vão e da largura do tabuleiro a diferença entre o RSA e o modelo especial da AASHTO tende a diminuir.

Os resultados obtidos pelos modelos de sobrecargas da norma sul-africana comprovam a influência que a geometria do tabuleiro tem na intensidade dos esforços. A relação percentual entre os esforços da SATCC e do RSA variam muito ao longo dos 5 casos de estudo. A variação que se verifica nos momentos fletores, que vai desde 20% até 65%, sensivelmente, justifica-se pela falta de relevância das sobrecargas pontuais da norma e por a carga linear, NA (1), variar consoante o comprimento do vão. Para o esforço transversal, as diferenças percentuais oscilam entre 5% e 50%.

Nos casos de estudo 3, 4 e 5, a relação percentual entre as quatro normas e o RSA diminui de uma forma geral. Este facto ocorre porque o modelo do VT do RSA condiciona muito as vigas exteriores dos tabuleiros, aumentando os esforços referentes ao regulamento português. Relativamente à norma norte-americana, por os modelos de sobrecargas pontuais serem mais estáticos, dificilmente se consideram os veículos nas posições mais desfavoráveis da estrutura. Por essa razão a AASHTO apresenta-se maioritariamente como a norma que produz os menores esforços. O EC1 permanece como a norma mais gravosa, sendo muito penalizadora no quinto caso de estudo, enquanto que a ABNT perde preponderância, apresentando efeitos próximos da SATCC. Esta perda de preponderância

da ABNT está relacionada com a opção tomada em ignorar o passeio nos tabuleiros constituídos por vigas pré-fabricadas. Enquanto que nos dois primeiros casos de estudo a norma brasileira distinguia-se das restantes por considerar a carga uniforme nos passeios, o que provocava um aumento dos esforços, no caso dos tabuleiros de vigas pré-fabricadas a aplicação das sobrecargas nas extremidades, onde se encontram os passeios, foi tida em conta para todas as normas, diminuindo assim a relevância da ABNT em termos de esforços.

Contudo é de salientar a variação das relações entre normas verificadas nos casos de estudo de tabuleiros constituídos por vigas pré-fabricadas. Esta alteração da sequência de normas justifica-se pelo facto dos modelos de sobrecargas condicionantes, de cada norma, alterarem constantemente de caso para caso.

Em suma, verifica-se que as sobrecargas uniformes prevalecem sobre as sobrecargas pontuais quando o tabuleiro aumenta de vão ou de largura da faixa de rodagem. Verifica-se também que o aumento da faixa de rodagem implica uma perda de preponderância das normas que definem vias fictícias.

Se os modelos de sobrecarga forem demasiado estáticos e não puderem ser aplicados nas zonas mais desfavoráveis do tabuleiro, os esforços induzidos serão de menor valor, como se verificou para a AASHTO nos casos de estudo de tabuleiros com vigas pré-fabricadas.

6.4 Resultados obtidos na análise transversal

Na direção transversal, foram estudados os máximos momentos fletores, positivos e negativos, em lajes entre vigas e o máximo momento fletor negativo na laje em consola. Este estudo foi realizado para todos os casos de estudo, na secção de meio vão e na secção de apoio de cada tabuleiro.

Apesar de terem sido estudadas várias situações, verificou-se quase sempre que o EC1 é a norma mais desfavorável de entre as cinco, enquanto que a AASHTO apresenta, em geral, os esforços de menor valor. As restantes normas vão alternando de relevância entre si consoante a situação analisada.

O RSA é mais desfavorável quando os painéis de laje são curtos, enquanto que a ABNT agrava os esforços quando os vãos de laje entre vigas são maiores. A SATCC condiciona os esforços quando a divisão em vias fictícias permite colocar as cargas nos pontos de inflexão das superfícies de influência de cada esforço.

Da análise dos resultados obtidos pelos modelos da norma norte-americana, verificou-se que um modelo menos intenso mas com as forças mais próximas entre si, como é o caso do *Tandem*, induz esforços semelhantes a um modelo com forças mais intensas e mais afastadas, como é o caso do *Truck*. Assim conclui-se que, quanto mais intenso e mais próximo for o sistema de cargas pontuais, mais se condiciona o esforço estudado.

6.5 Resultados obtidos na análise das superfícies de influência

Para validar e delimitar o campo de aplicação das superfícies de influência, compararam-se todos os valores dos esforços transversais condicionantes, obtidos nos modelos de elementos finitos, e compararam-se com os resultados obtidos por superfícies de influência.

Nos tabuleiros constituídos por vigas betonadas *in-situ* verificou-se uma aproximação razoável entre os esforços obtidos pelos dois métodos, na secção de meio vão. Contudo, na secção de apoio, no que diz respeito ao momento negativo no interior da laje, os dois métodos apresentaram algumas diferenças nos valores. Tal justifica-se pela falta de ajustamento da superfície de influência considerada à secção do tabuleiro estudado. Efetivamente, a superfície de influência não se aproxima das condições de

encastramento fornecidas pela secção de apoio, visto que não existem superfícies de influência que simulem corretamente o encastramento fornecido pelas carlingas, pilares e vigas na secção de apoio.

Nos casos de estudo 1 e 2 foram analisadas duas variantes de vão corrente, com 25,00 m e 40,00 m. Essa variação do vão do tabuleiro não é considerada no uso das superfícies de influência, o que permitiu entender a influência que a variação do vão tem na relação entre os dois métodos. Tanto no primeiro como no segundo caso de estudo, verifica-se que os esforços apresentam valores mais próximos, entre os dois métodos, na segunda variante, o que leva a concluir que o aumento do vão conduz a uma aproximação dos esforços numéricos ao esforços obtidos por superfícies de influência.

Relativamente aos casos de estudo 3, 4 e 5, verificou-se uma boa aproximação dos valores dos momentos fletores positivos obtidos pelos dois métodos. Contudo, para os momentos negativos, os resultados são mais irregulares. Nos modelos de elementos finitos observam-se diferentes deformadas no tabuleiro quando este é submetido aos diferentes modelos de sobrecargas das 5 normas. Essa deformação não é tida em conta no método das superfícies de influência, gerando esforços mais gravosos que os do método numérico.

6.6 Perspetivas de desenvolvimentos futuros

No seguimento do trabalho desenvolvido na presente dissertação, seria interessante expandir os resultados obtidos para verificação de segurança e determinar novas medidas de pré-dimensionamento.

Mais especificamente, seria interessante desenvolver um estudo de aferir a quantidade de pré-esforço que cada norma requer para verificar a segurança estrutural, e com base nestes resultados definir em percentagem de pré-esforço relativo ao RSA.

Ainda se poderá realizar um estudo de verificação da segurança das pontes portuguesas para a norma europeia, ou seja, verificar se em determinadas obras o pré-esforço colocado na ponte é suficiente para aguentar o diferencial das sobrecargas, entre a norma portuguesa e a norma europeia. Seria igualmente interessante testar medidas de reforço estrutural para verificar a segurança à norma europeia.

Referências Bibliográficas

AASHTO (2007); *LFRD Bridge Design Specifications – 5th Edition*; AASHTO, Washington DC.

EC1 – Parte 2 (2003); *EN 1991-2 Eurocode 1: Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridge*; CEN, Bruxelas.

EC1 – Parte 2 – Anexo Nacional (2012); Proposta de Anexo Nacional de aplicação da norma NPEN1991-2; CT115; LNEC, Lisboa.

ALVES, M. (2012); *Modelação de sobrecargas rodoviárias. Estudo comparativo entre diferenças normas*, Tese de Mestrado; ISEL – IPL, Lisboa.

CALÇADA, R. A. (2001); *Avaliação Experimental e Numérica de Efeitos Dinâmicos de Cargas de Tráfego em Pontes Rodoviárias*, Tese de Mestrado; FEUP, Porto.

CROCE, P., MALAKATAS, N. (2010); *EN 1991. Actions on bridges. Workshop on Bridge Design to Eurocodes*; Viena.

CUNHA, F. N. (2010); *Dimensionamento de Tabuleiros de Pontes Com Vigas de Betão Pré-Fabricado*, Tese de Mestrado; FEUP, Porto.

FREITAS, J. M. (2008); *Acção do Tráfego Rodoviário Em Pontes de Betão Armado*, Tese de Mestrado; FEUP, Porto.

GONÇALVES, F. R. (2009); *Viadutos de Tabuleiro Em Vigas de Betão Pré-Esforçado*, Tese de Mestrado; FEUP, Porto.

HOMBERG, H. (1972); *Dalles D'épaisseur Variable*; Éditions Dunod, Paris.

JONES, D. (2002); *The Development Of Satcc Standard Specifications And Design Guides For Roads And Bridges*; CSIR Transportek, South Africa.

LUKIANENKO, A. (2008); *Comparison of Russian norms (SNIps) and European norms (Eurocodes) for road and railway bridge*; Tese de Mestrado, Saimaa University of Applied Sciences, Lappeenranta, Finlândia.

MASCARANHAS, A. T. (1982); *O cálculo estrutural regulamentar e as acções de tráfego em pontes rodoviárias*; Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas; Lisboa.

MASCARANHAS, A. T. (1978); *Segurança e acções em pontes rodoviárias: Acções verticais devidas ao tráfego e correspondentes sistemas regulamentares europeus de cargas de cálculo*; LNEC, Lisboa

MILLER, R., SWANSON, J. (2007); *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications: Loading and General Information*; University of Cincinnati, Cincinnati.

NBR – 7188 (1982); *Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre*; ABNT, Rio de Janeiro.

NP EC1 – Parte 2 (2012); *Proposta de Anexo Nacional de Aplicação da Norma NP EN 1991-2*; CTPN; Portugal.

O'BRIEN, E., CAPRIANI, C., O'CONNELL, G. (2006); *Bridge assessment loading: a comparison of West and Central/East Europe*; Bridge Structures, 2 (1): 25-33; University College Dublin; Dublin.

O'BRIEN, E., ENRIGHT, B., CAPRIANI, C. (2008); *Implications of Future Heavier Trucks for Europe's Bridg*, Artigo Científico; Dublin Institute of Technology; Dublin.

PIPA, M. (2009); *Evolução da Regulamentação de Estruturas em Portugal*; LNEC, Lisboa.

PINTO, A. (2010); *Eurocodes: Implementation and further development*. Workshop on Bridge Design to Eurocodes; Viena.

PUCHER, A. (1964); *Influence Surfaces of Elastic Plates*; Wien.

RESEP (1969); *Regulamento de Solicitações em Edifícios e Pontes (RSEP)*, Decreto nº 44041.

RSA (1983); *Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes – Decreto Lei nº 235/83*; MOPTC, Portugal.

ROBALO, J.N. (2013); *Structural Analysis of Road Bridge Decks: Comparison between the Portuguese code (RSA) and the Eurocode Load Model 1*, Tese de Mestrado; IST – UTL, Lisboa.

SATCC (2001); *Code of Practice for the Design of Road Bridges and Culverts*; SATCC, South Africa.

SOUSA, C.F. (2004); *Continuidade estrutural em tabuleiros de pontes construídos com vigas pré-fabricadas. Soluções com ligação em betão armado*, Tese de Mestrado; FEUP, Porto.

SARAIVA, M. F. (2013); *Efeitos estruturais das sobrecargas rodoviárias definidas nas normas mais utilizadas pela engenharia portuguesa em tabuleiros de betão de nervura única e em caixão*, Tese de Mestrado; FCT – UNL, Almada.

ANEXOS

Anexo A1

Representação dos carregamentos da análise longitudinal

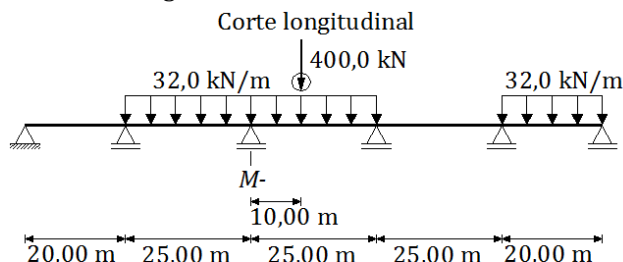
Apresentam-se os carregamentos dos modelos de sobrecarga utilizados na análise longitudinal. Os esquemas apresentados são meramente representativos. Apesar dos comprimentos dos vãos serem proporcionais, devido à diferença na gama de valores os afastamentos entre as cargas não apresentam proporcionalidade relativamente ao comprimento dos vãos.

A1.1 – Caso de estudo 1

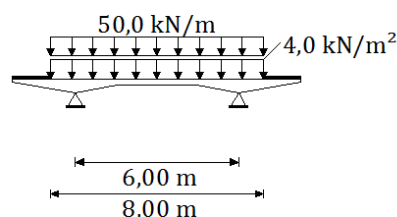
- Variante com 25,00 m de vão corrente

RSA

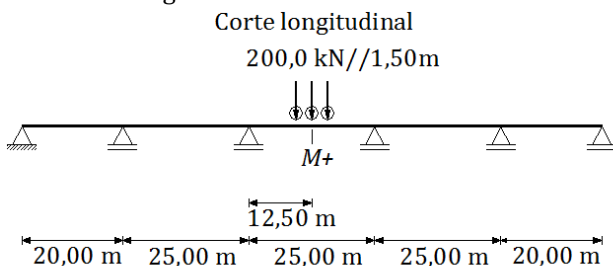
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



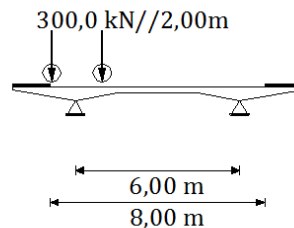
Corte transversal na secção M-



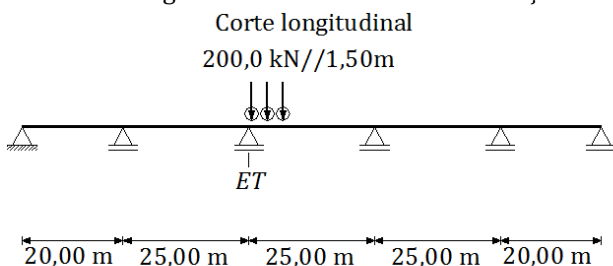
- Carregamento condicionante do momento fletor positivo



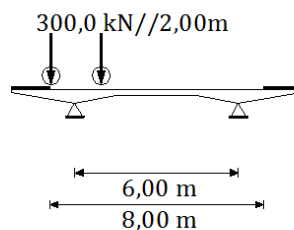
Corte transversal na secção M+



- Carregamento condicionante do esforço transverso

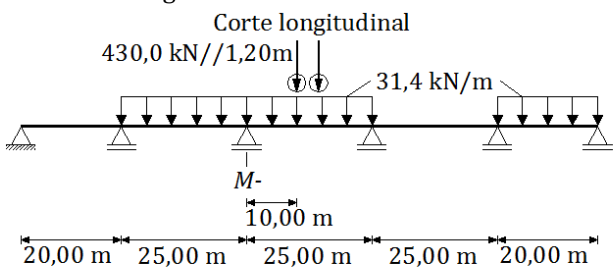


Corte transversal na secção ET

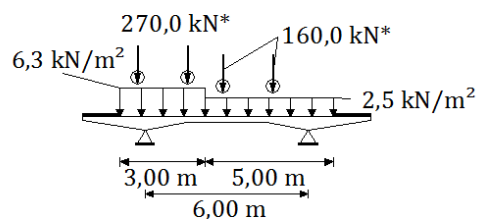


EC1

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo

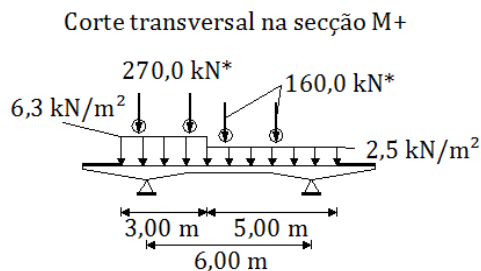
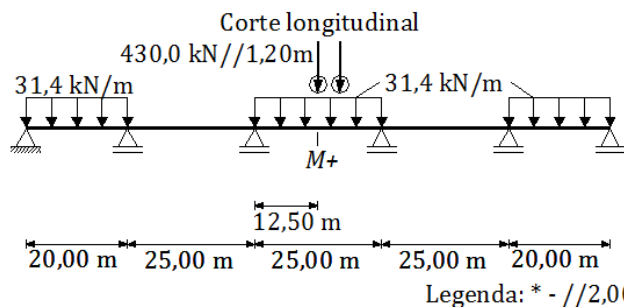


Corte transversal na secção M-

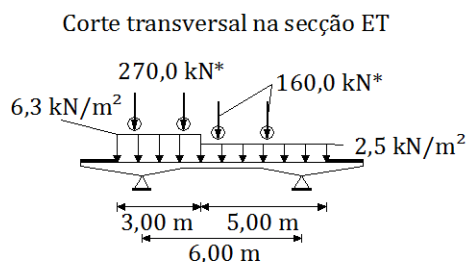
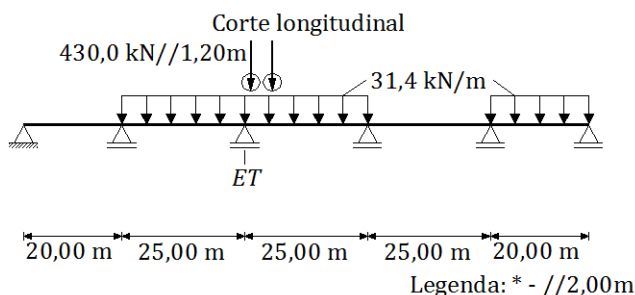


Legenda: * - // 2,00m

- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

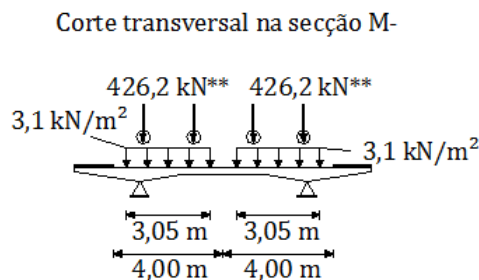
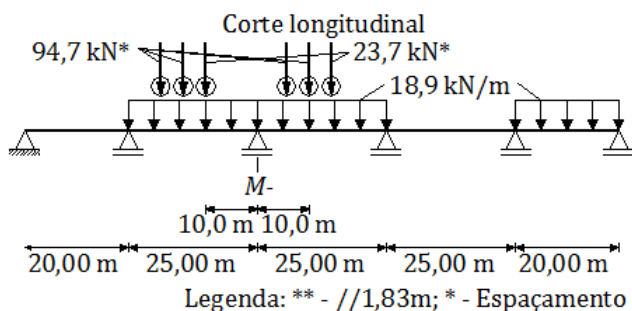


- Carregamento condicionante do esforço transverso

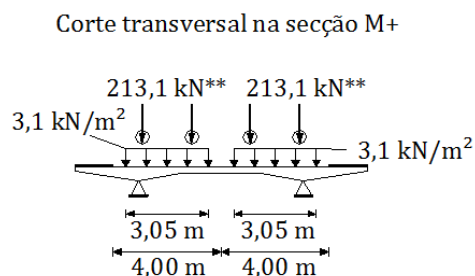
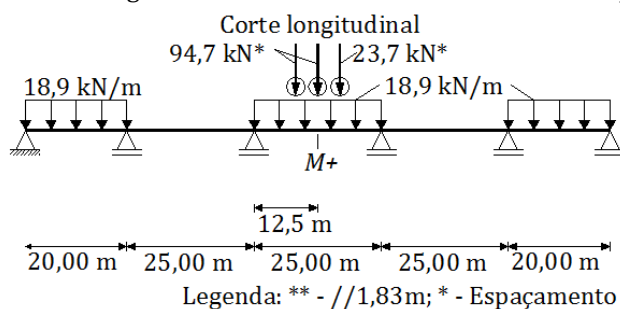


AASHTO

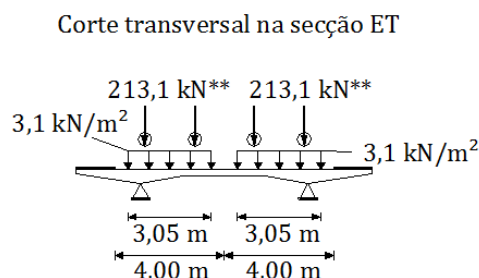
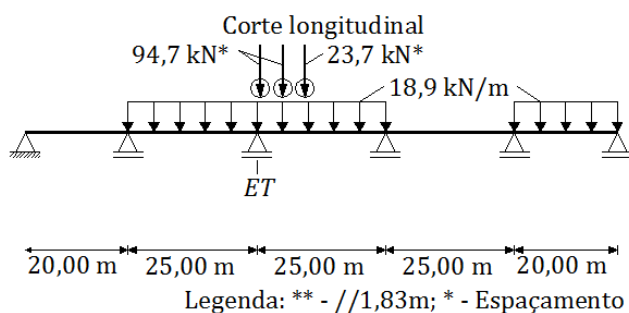
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

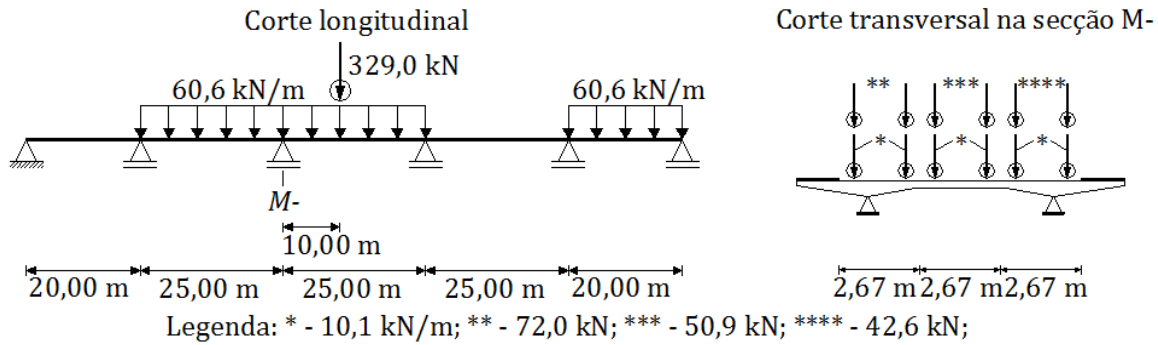


- Carregamento condicionante do esforço transverso

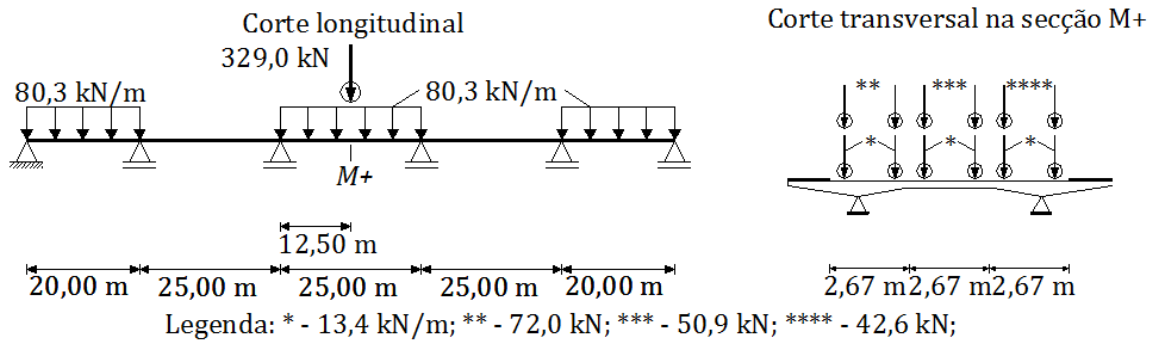


SATCC

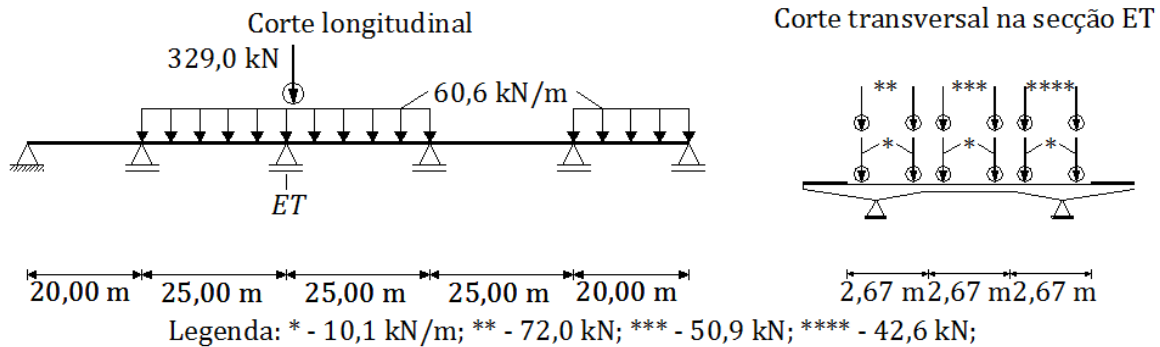
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

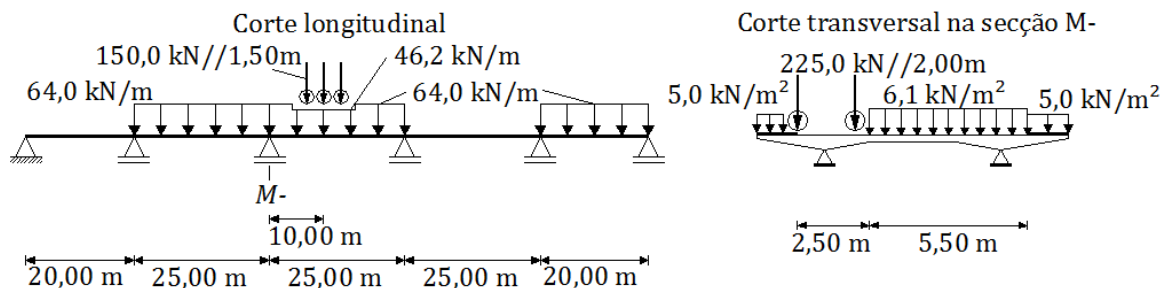


- Carregamento condicionante do esforço transverso

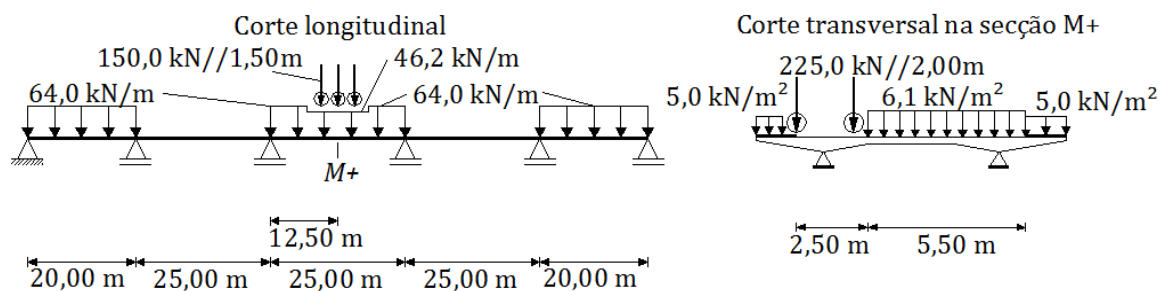


ABNT

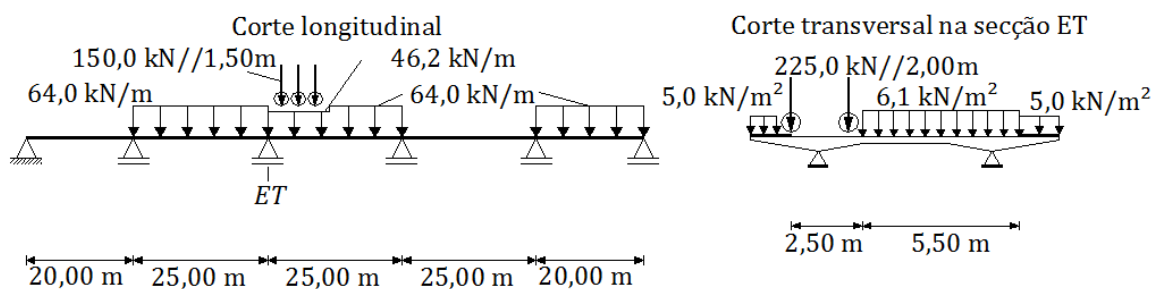
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo



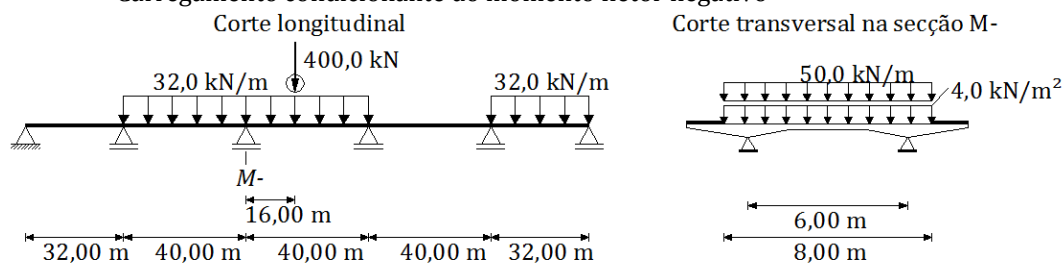
- Carregamento condicionante do esforço transverso



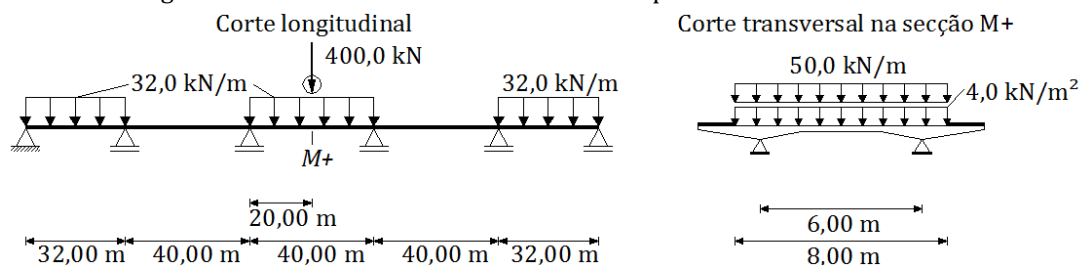
- Variante com 40,00 m de vão corrente

RSA

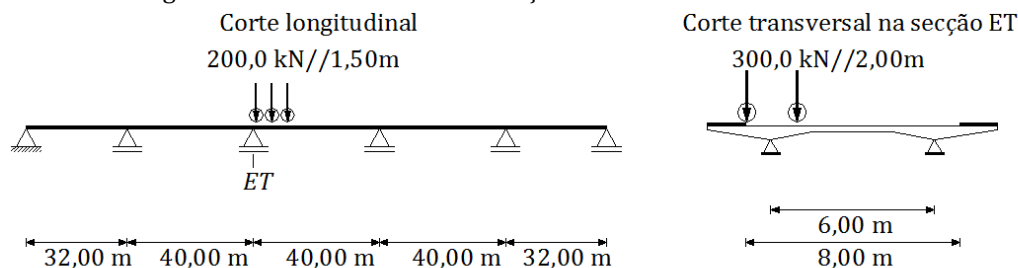
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

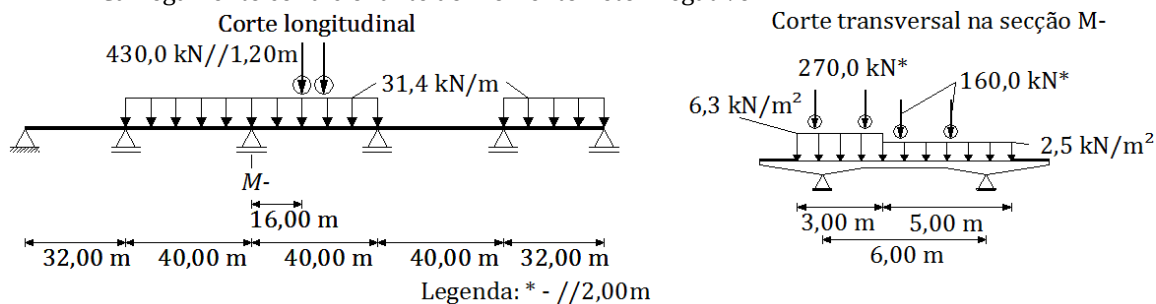


- Carregamento condicionante do esforço transverso

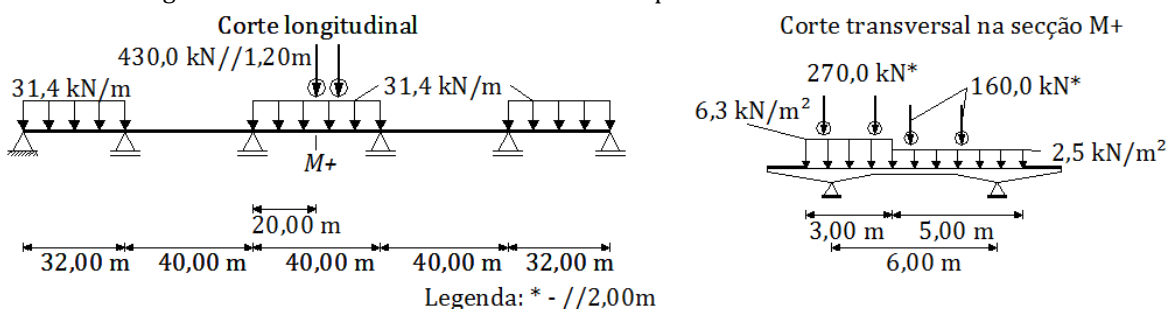


EC1

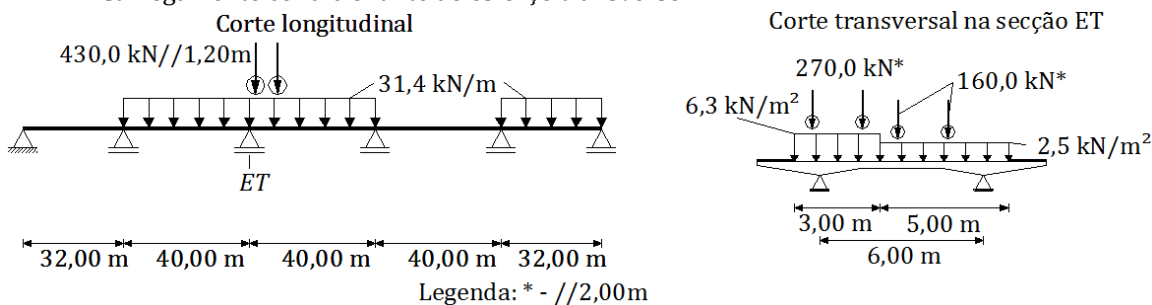
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

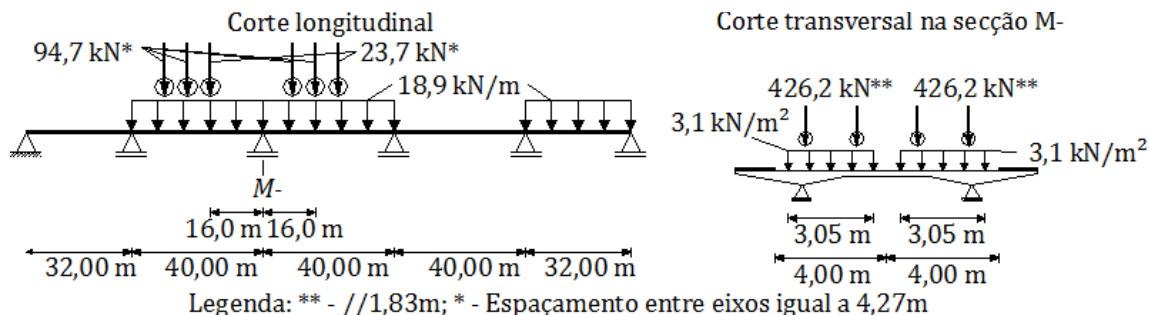


- Carregamento condicionante do esforço transverso

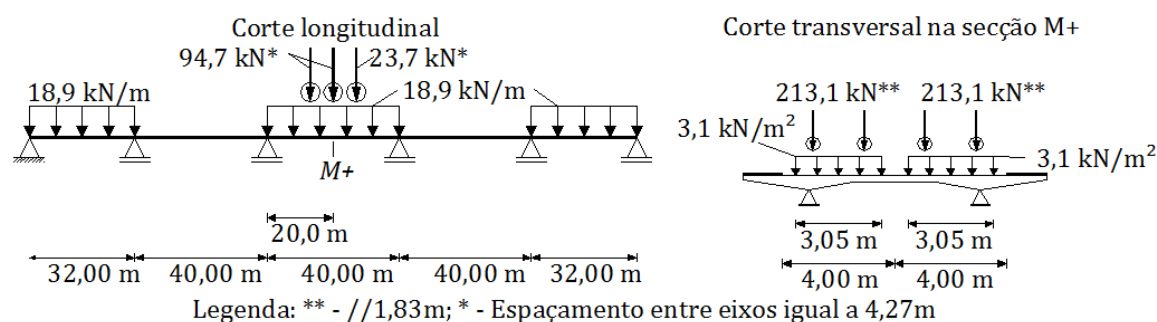


AASHTO

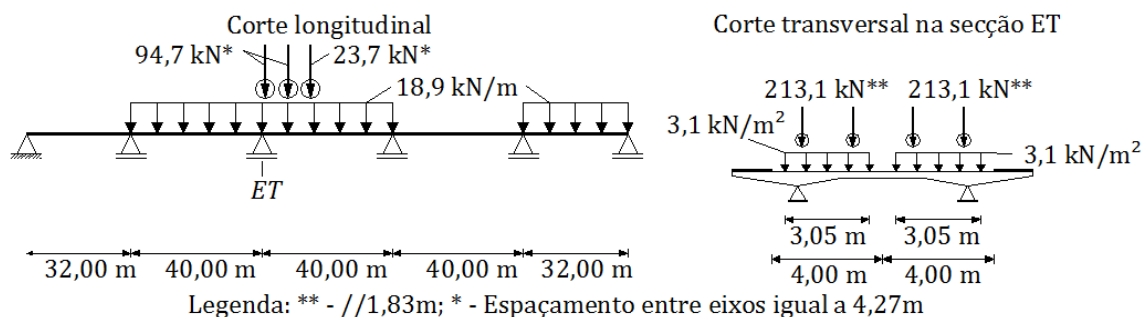
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

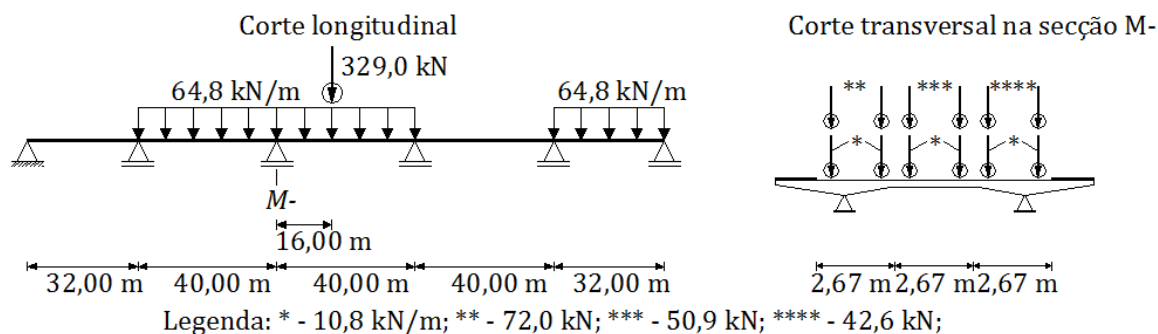


- Carregamento condicionante do esforço transverso

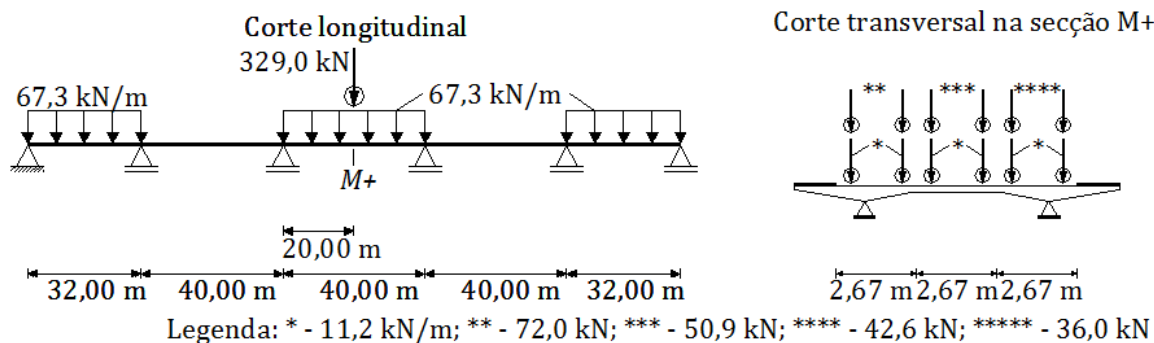


SATCC

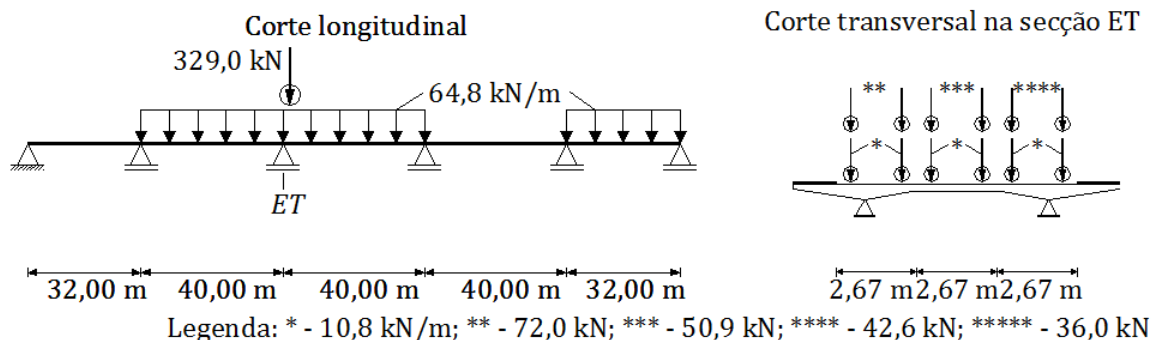
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

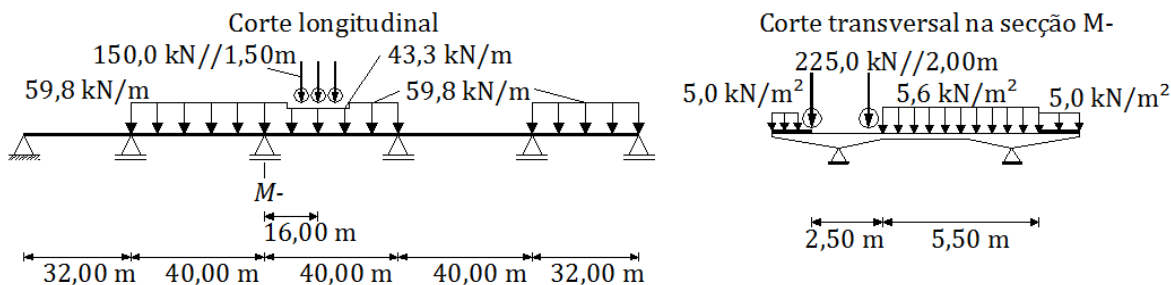


- Carregamento condicionante do esforço transverso

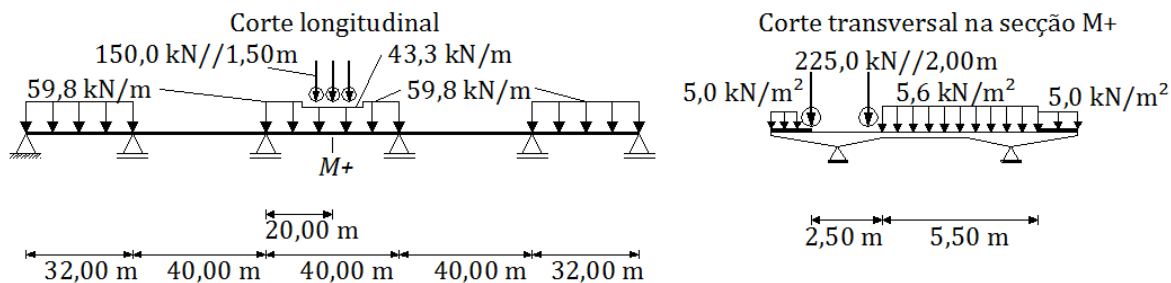


ABNT

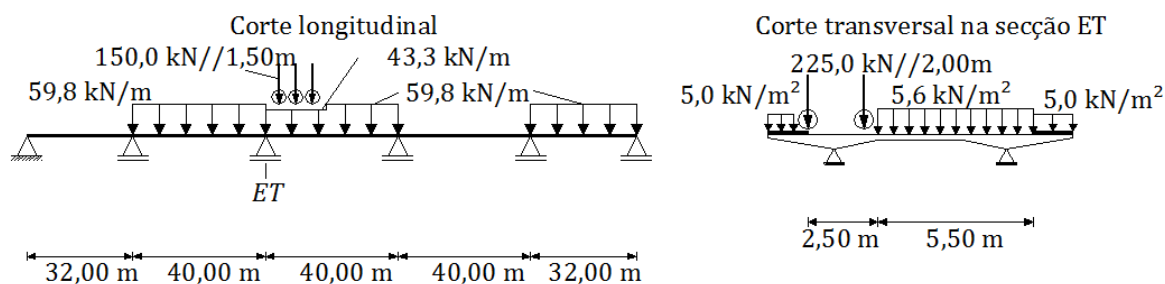
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo



- Carregamento condicionante do esforço transverso

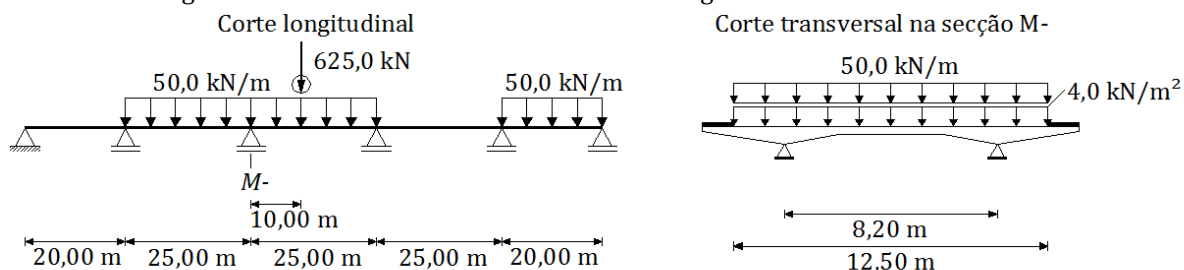


A1.2 – Caso de estudo 2

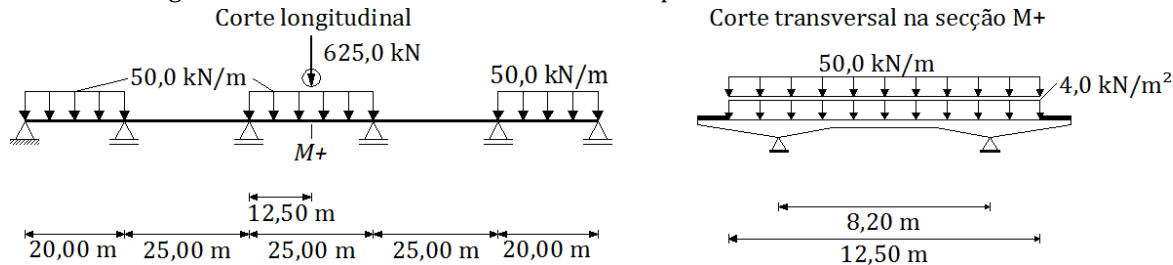
- Variante com 25,00 m de vão corrente

RSA

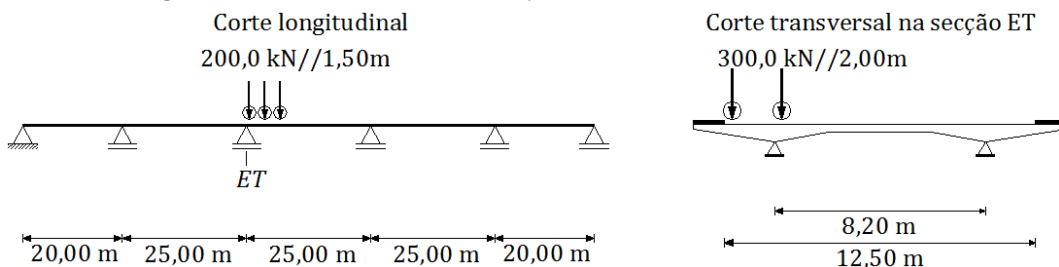
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

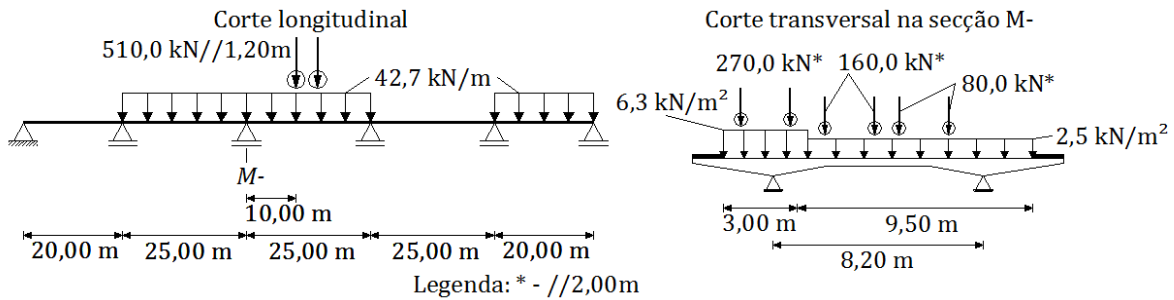


- Carregamento condicionante do esforço transverso

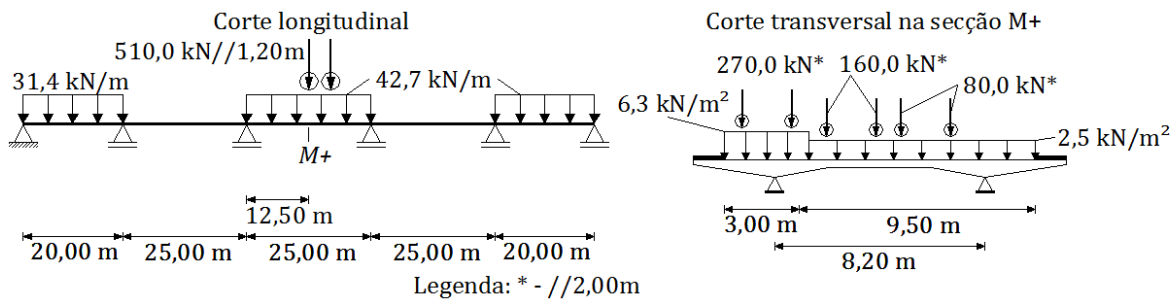


EC1

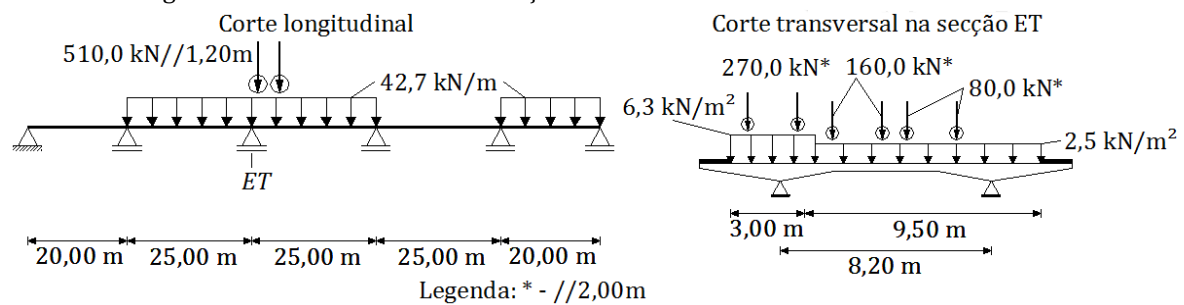
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

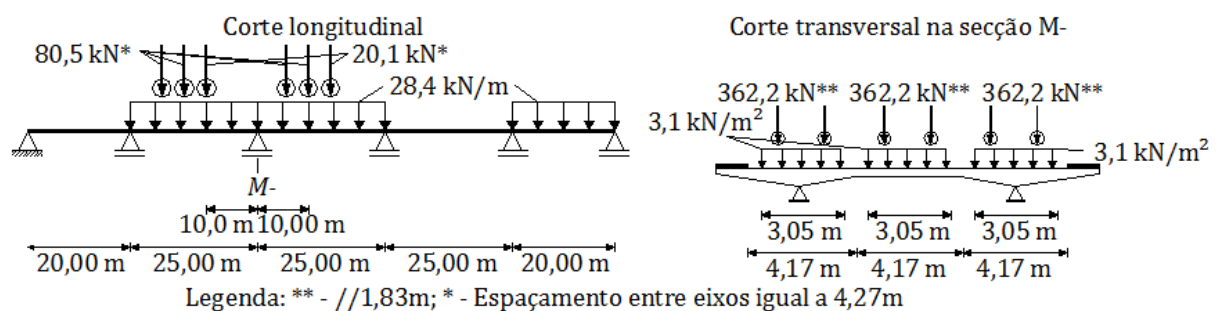


- Carregamento condicionante do esforço transverso

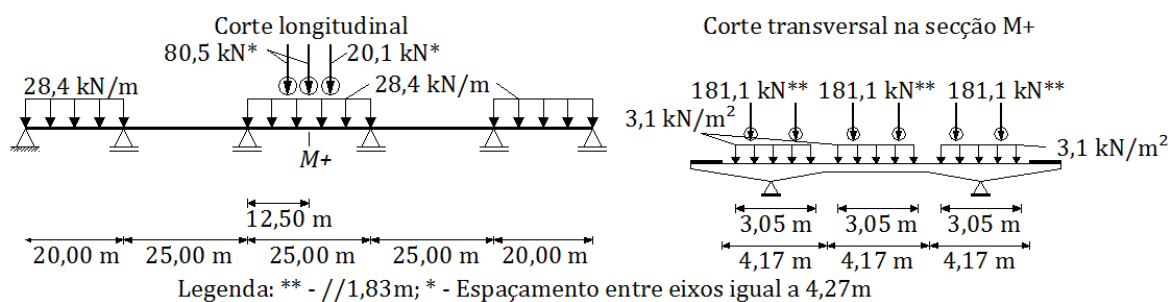


AASHTO

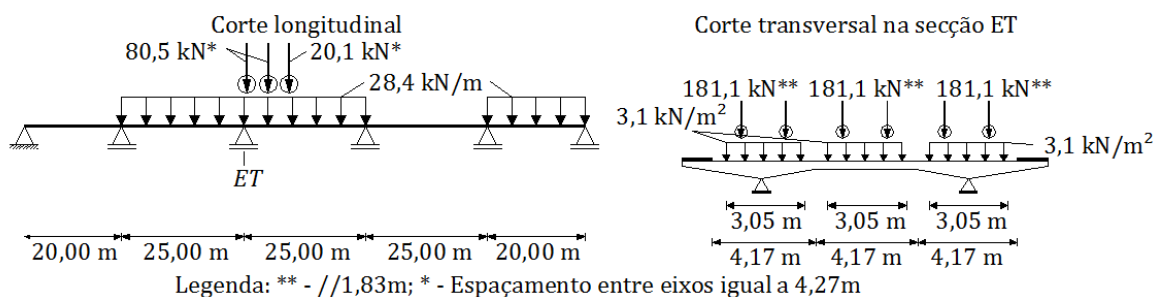
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

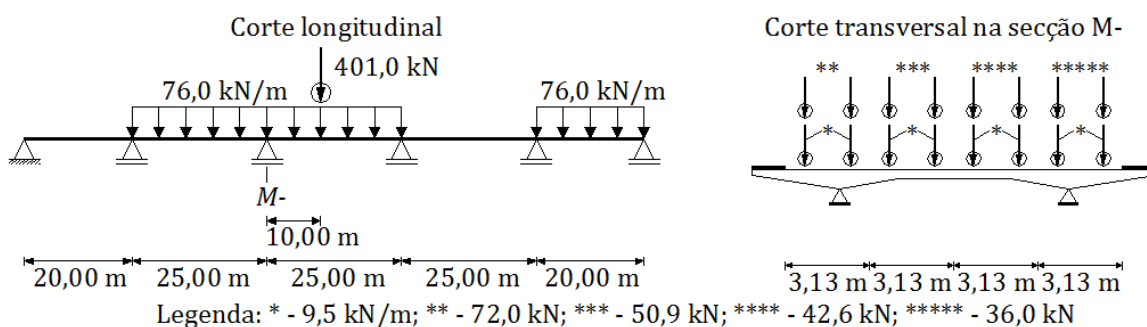


- Carregamento condicionante do esforço transverso

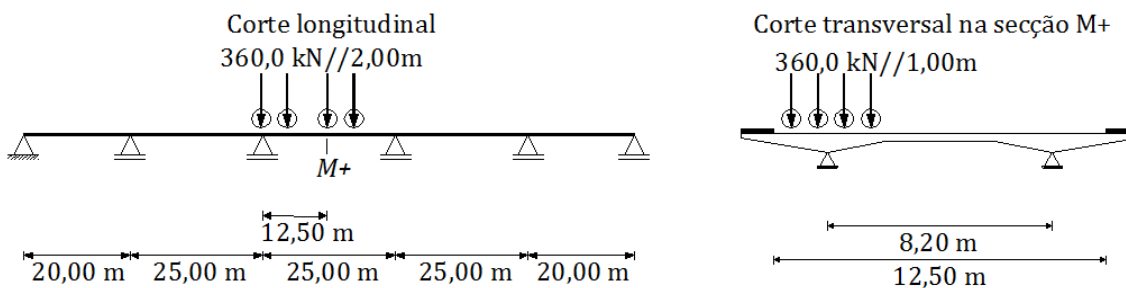


SATCC

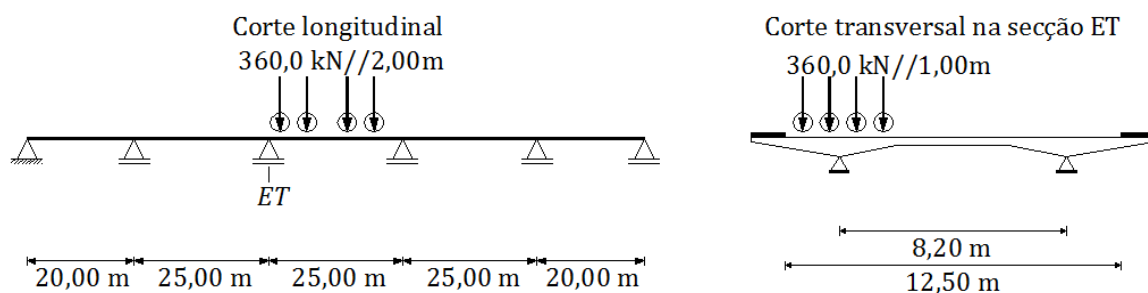
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

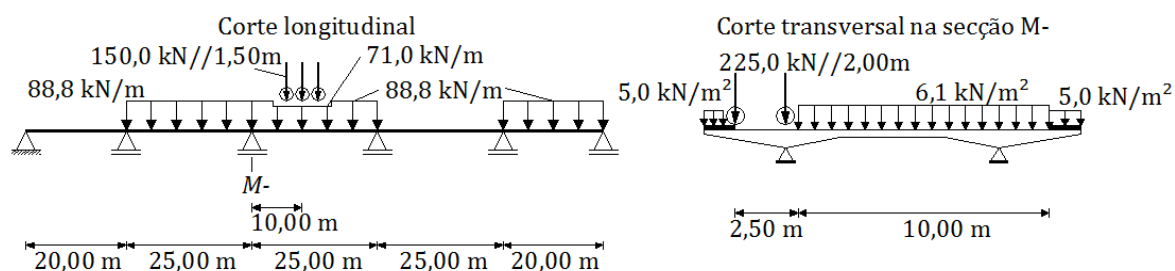


- Carregamento condicionante do esforço transverso

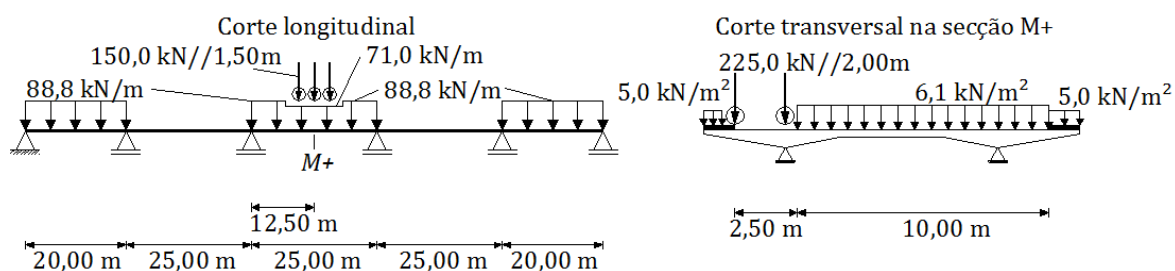


ABNT

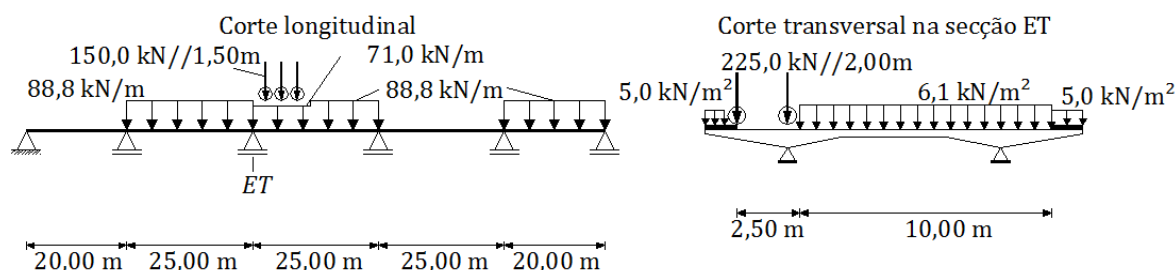
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo



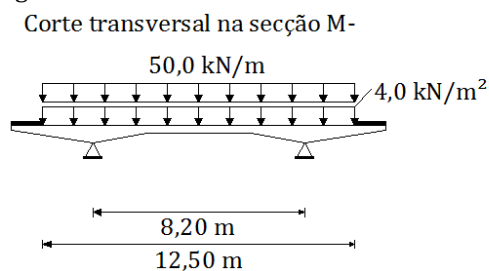
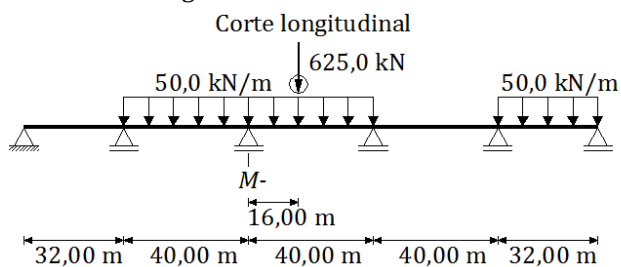
- Carregamento condicionante do esforço transverso



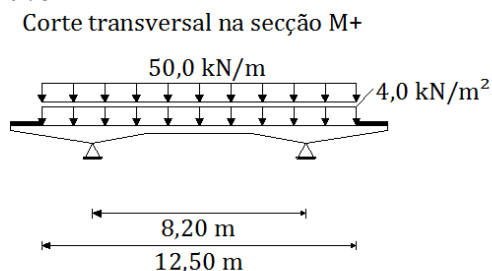
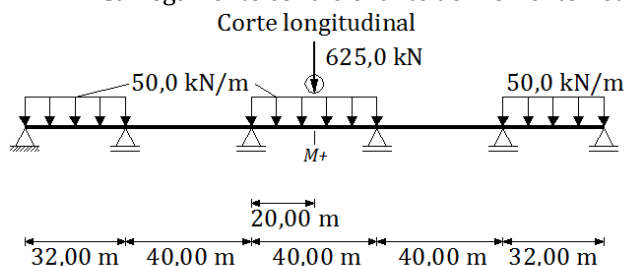
- Variante com 40,00 m de vão corrente

RSA

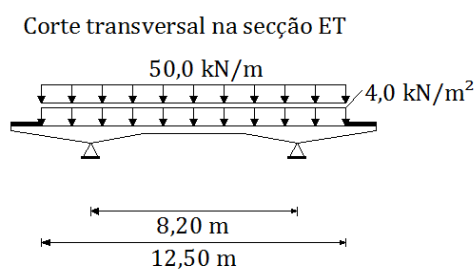
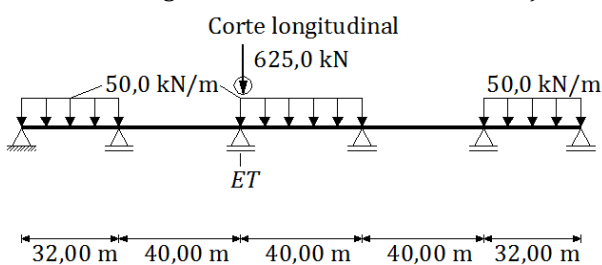
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

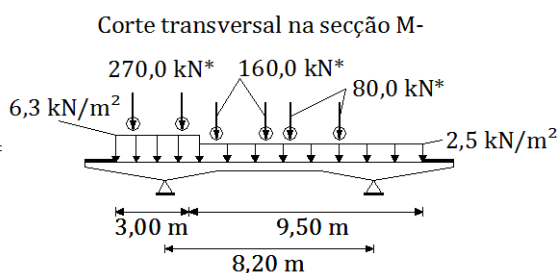
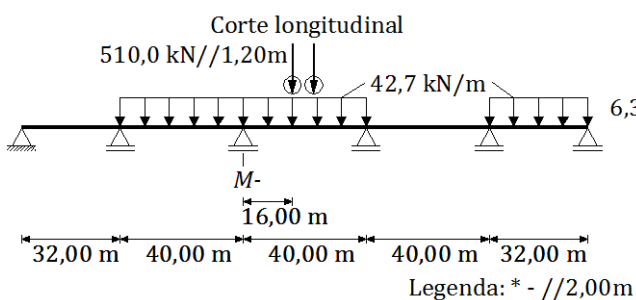


- Carregamento condicionante do esforço transverso

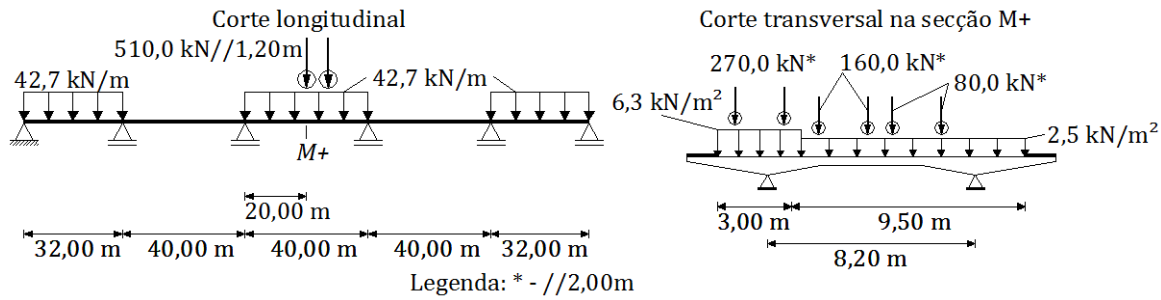


EC1

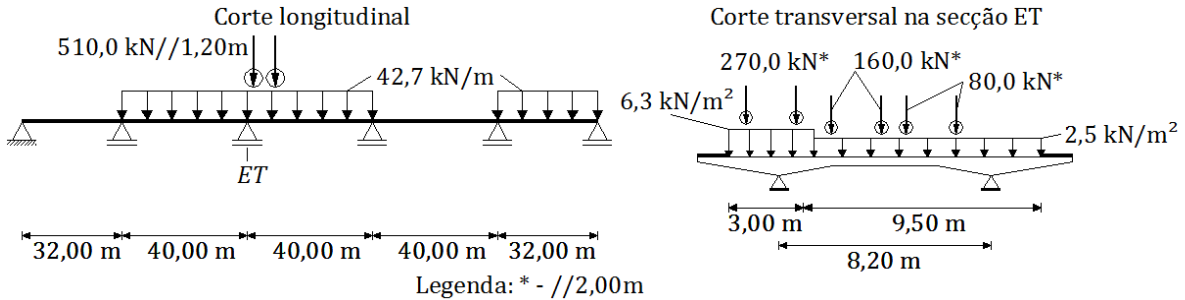
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

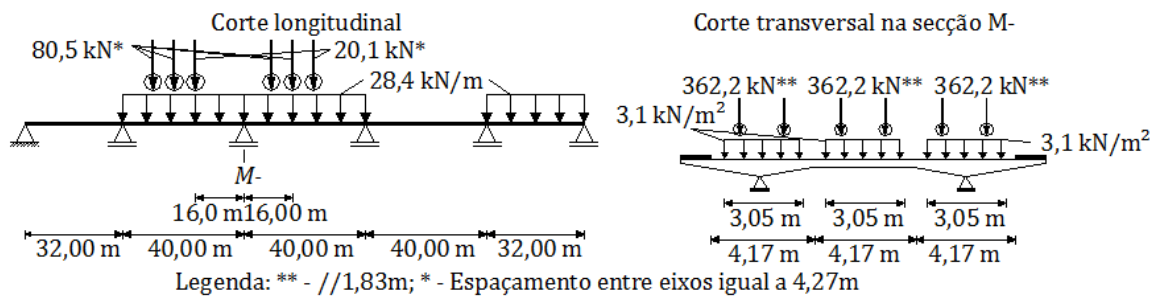


- Carregamento condicionante do esforço transverso

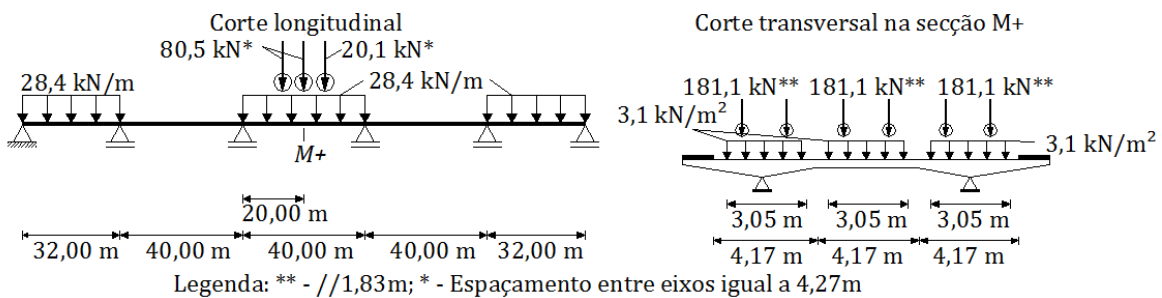


AASHTO

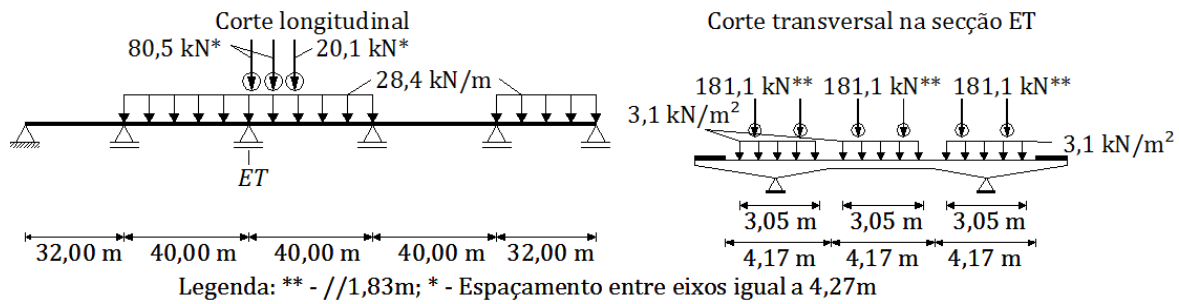
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

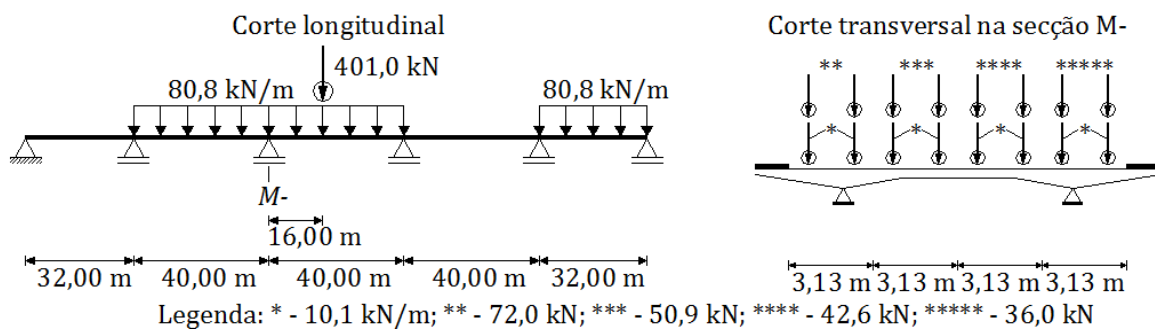


- Carregamento condicionante do esforço transverso

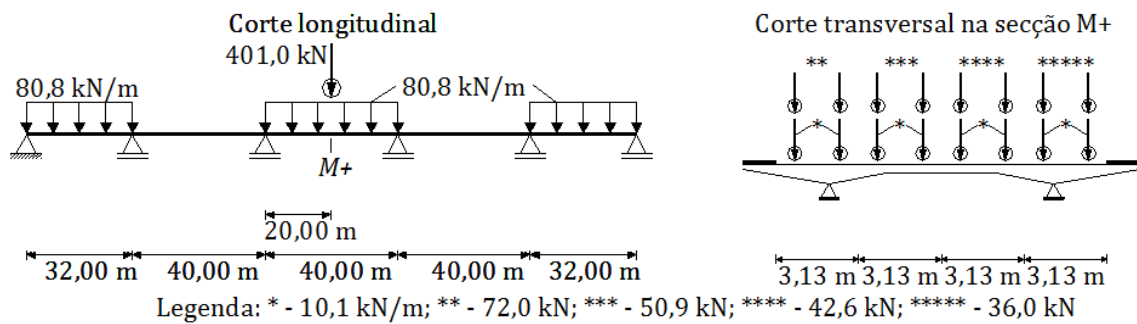


SATCC

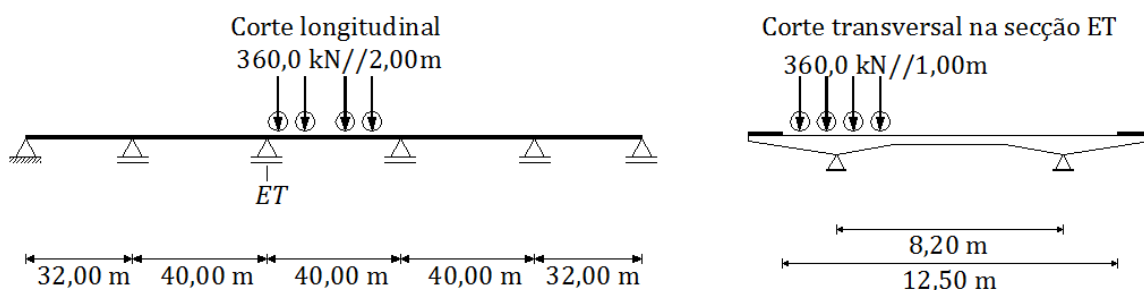
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

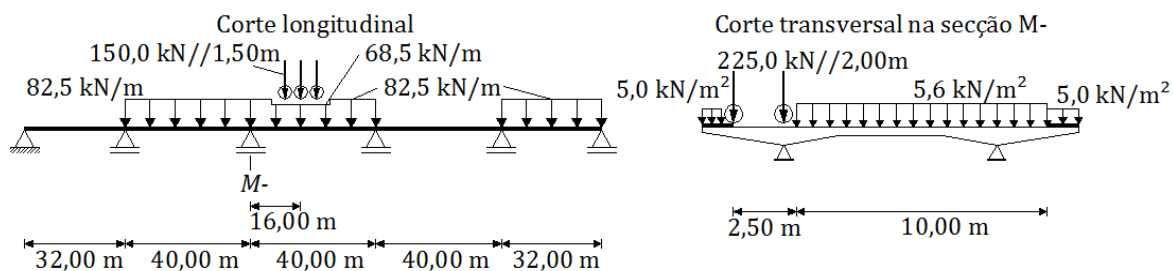


- Carregamento condicionante do esforço transverso

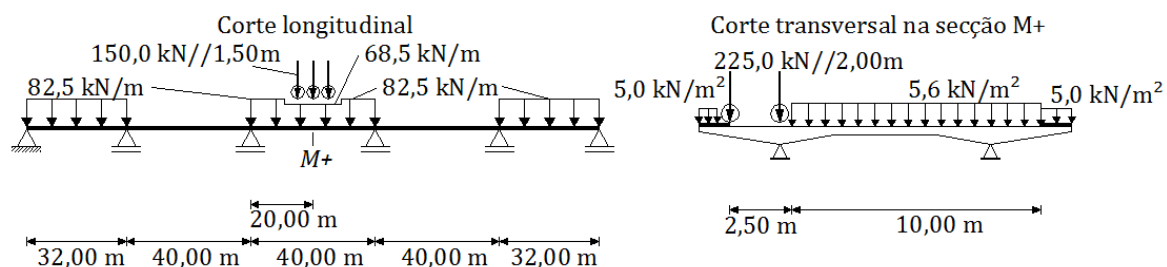


ABNT

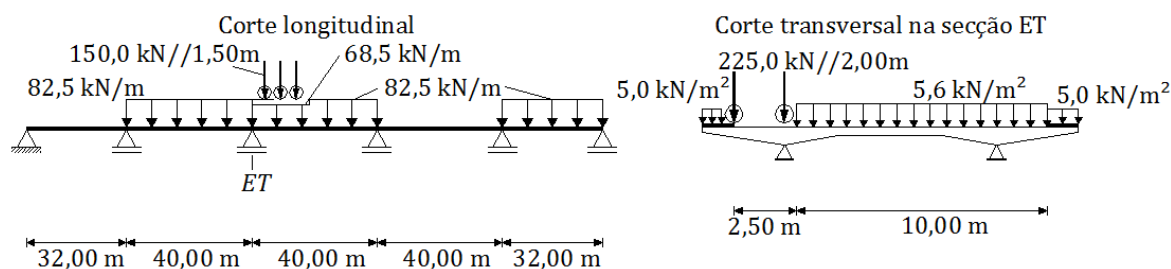
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo



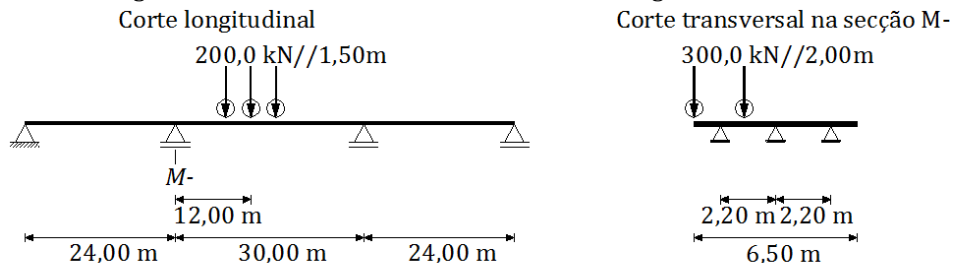
- Carregamento condicionante do esforço transverso



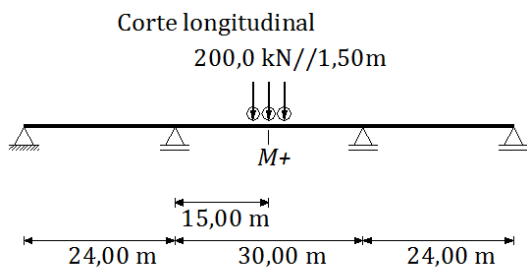
A1.3 – Caso de estudo 3

RSA

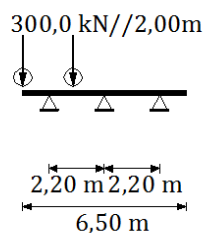
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



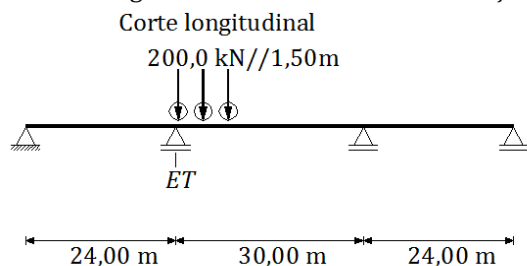
- Carregamento condicionante do momento fletor positivo



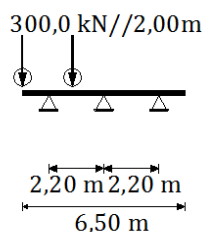
Corte transversal na secção M+



- Carregamento condicionante do esforço transverso

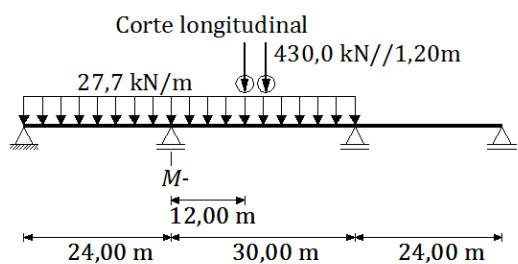


Corte transversal na secção ET

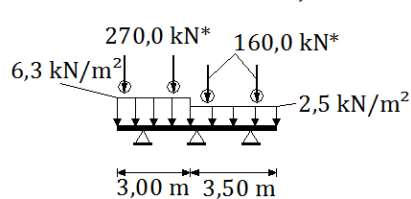


EC1

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo

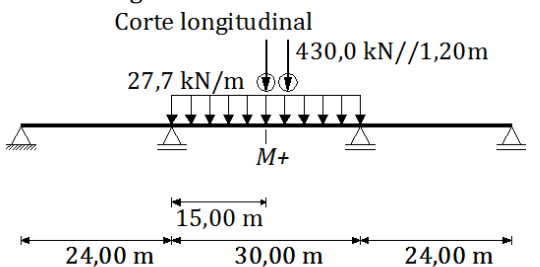


Corte transversal na secção M-

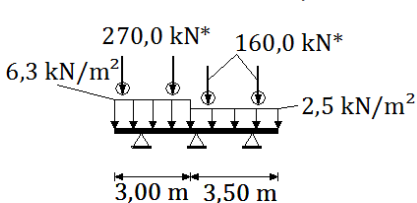


Legenda: * - //2,00m

- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

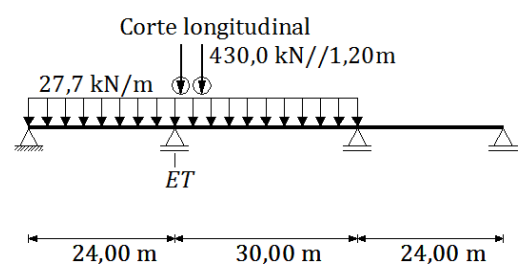


Corte transversal na secção M+

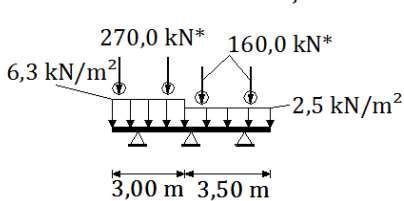


Legenda: * - //2,00m

- Carregamento condicionante do esforço transverso



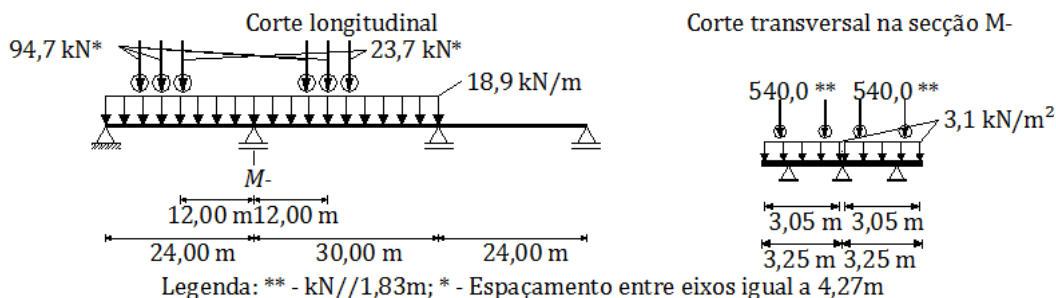
Corte transversal na secção ET



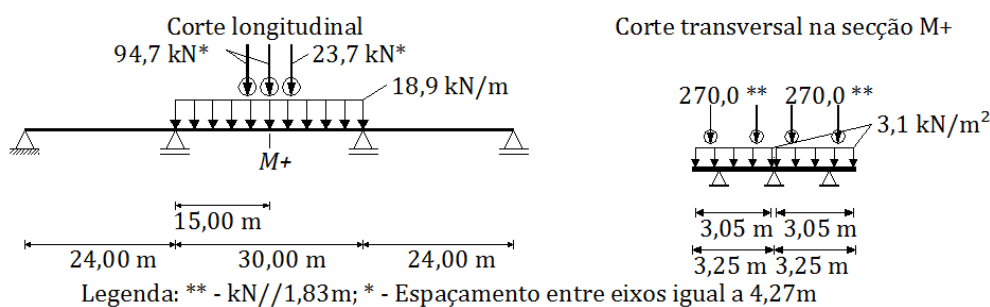
Legenda: * - //2,00m

AASHTO

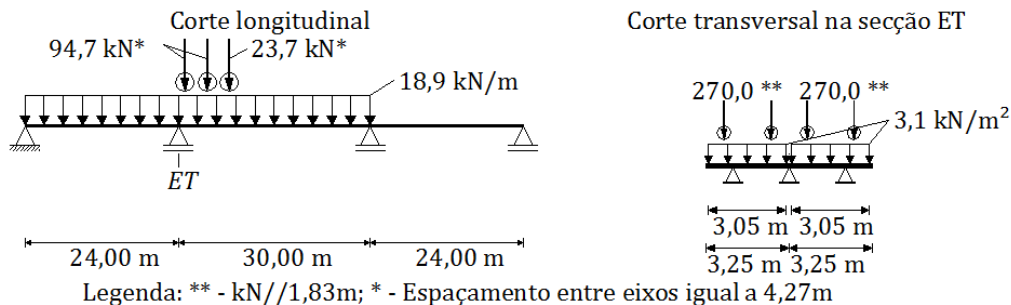
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

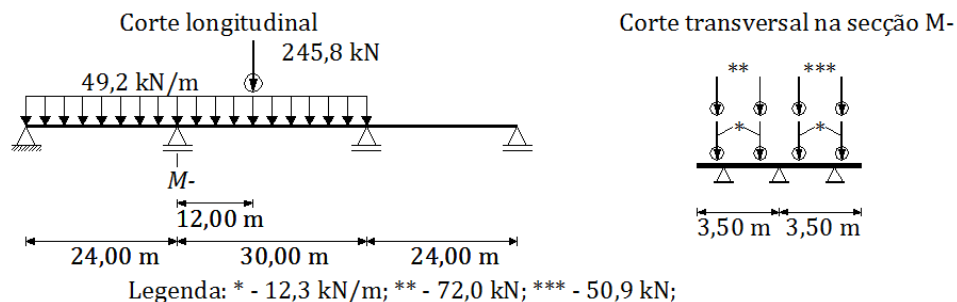


- Carregamento condicionante do esforço transverso

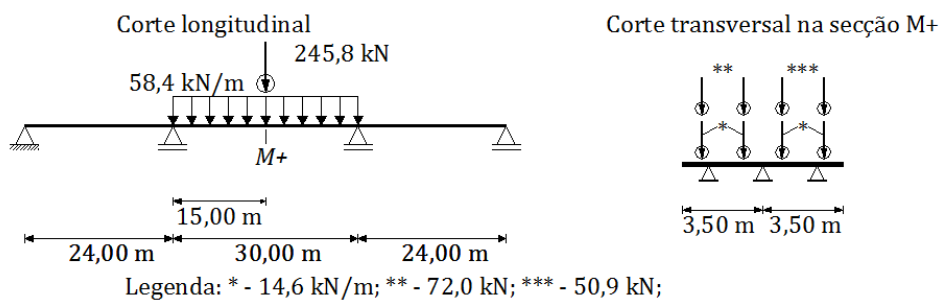


SATCC

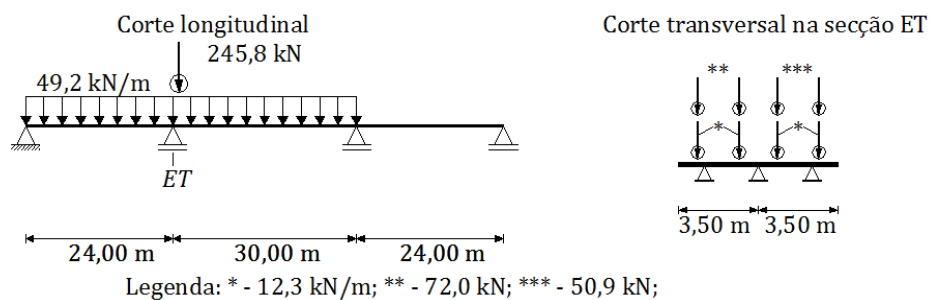
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

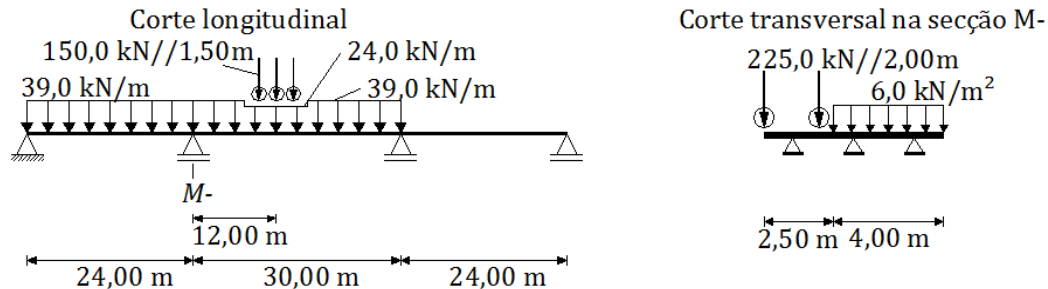


- Carregamento condicionante do esforço transverso

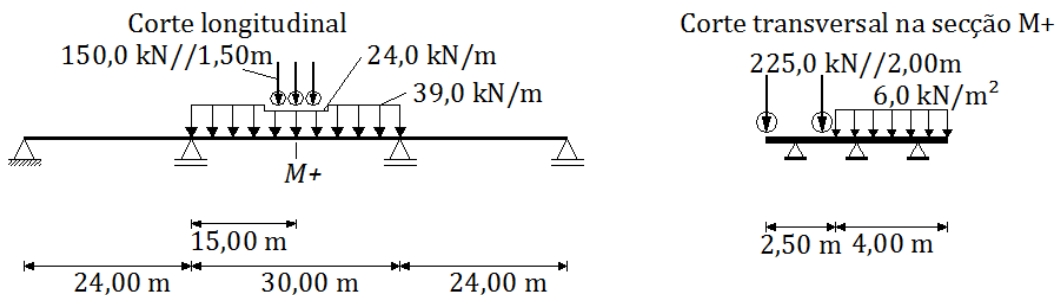


ABNT

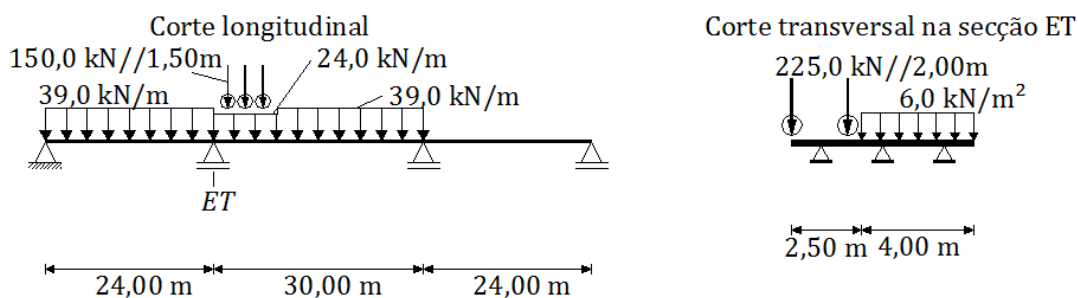
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo



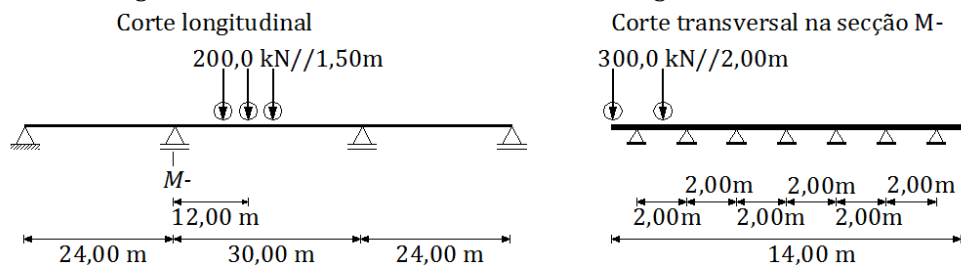
- Carregamento condicionante do esforço transverso



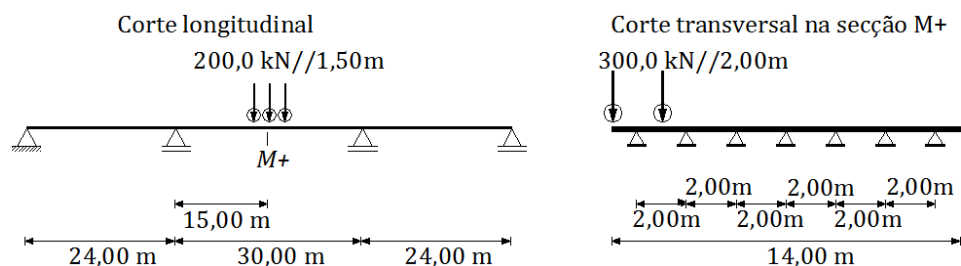
A1.4 – Caso de estudo 4

RSA

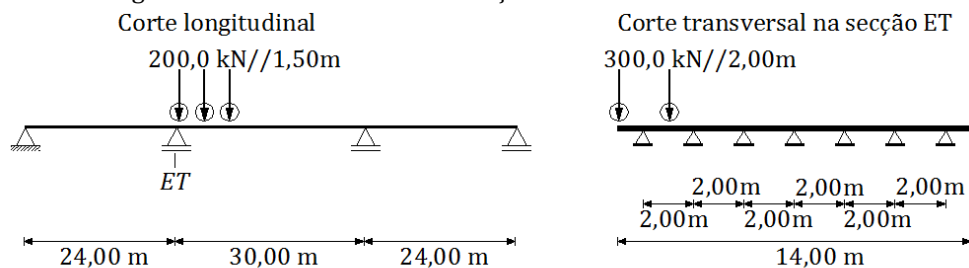
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

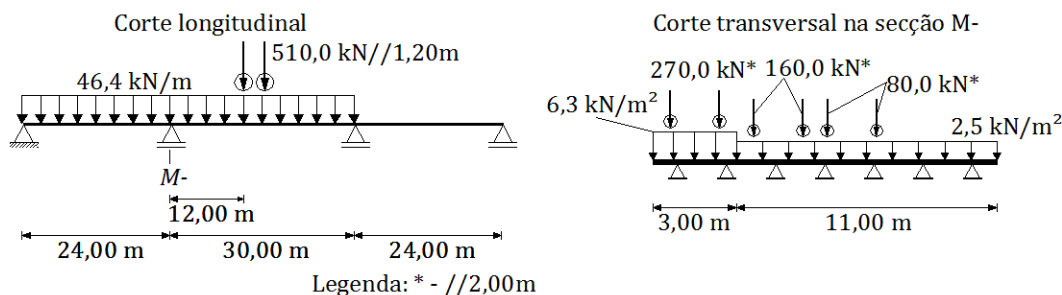


- Carregamento condicionante do esforço transverso

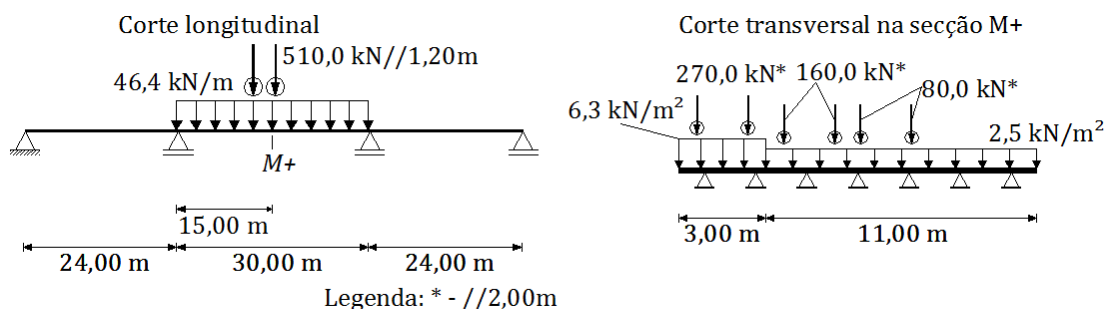


EC1

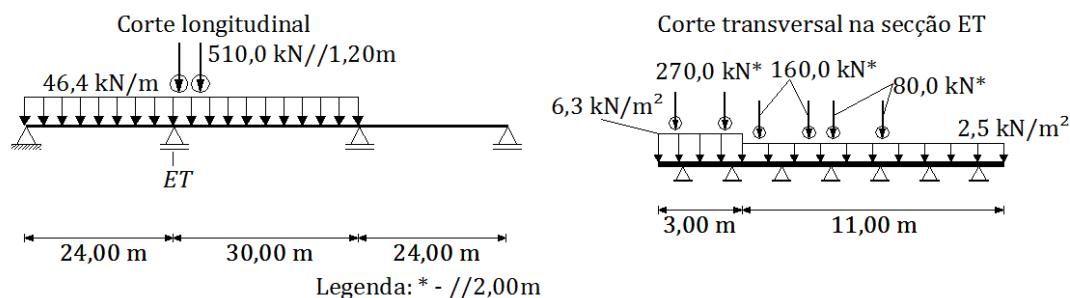
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

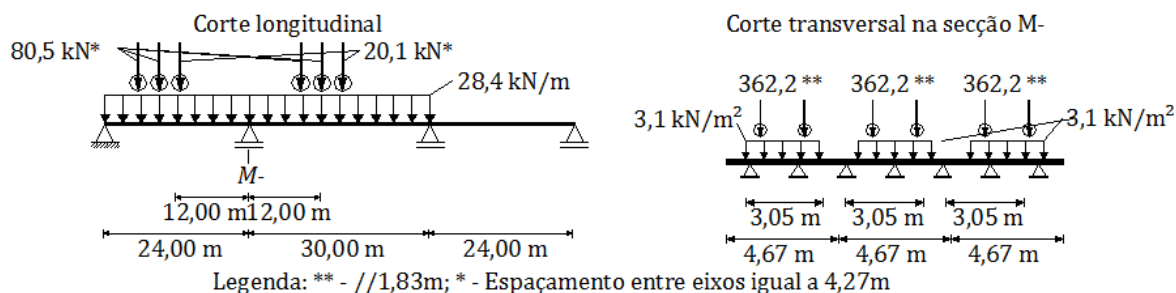


- Carregamento condicionante do esforço transverso

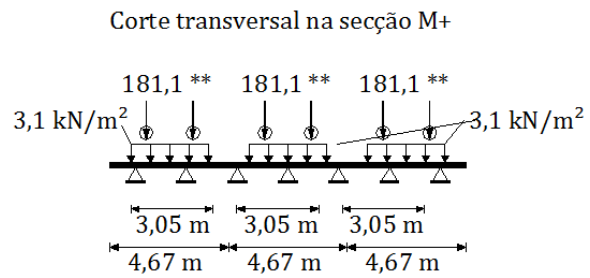
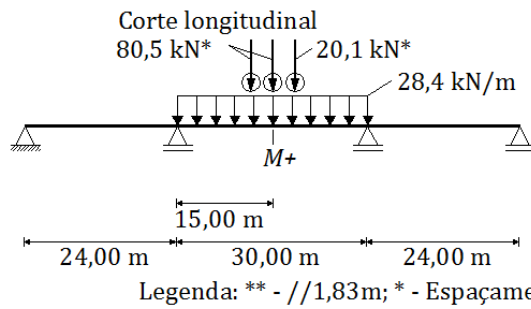


AASHTO

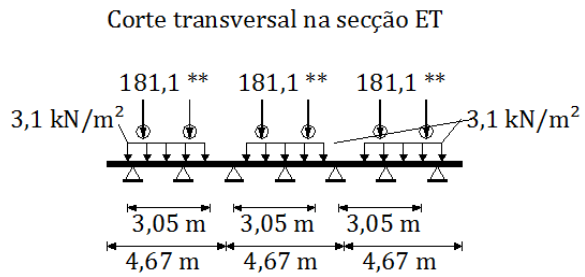
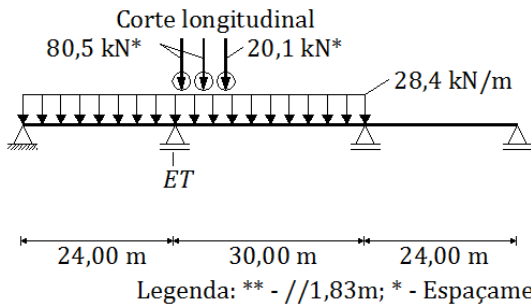
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

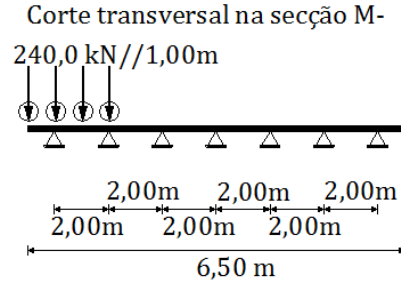
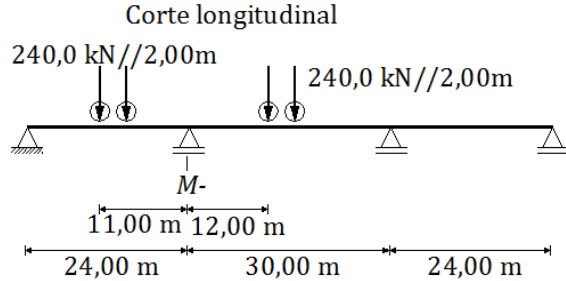


- Carregamento condicionante do esforço transverso

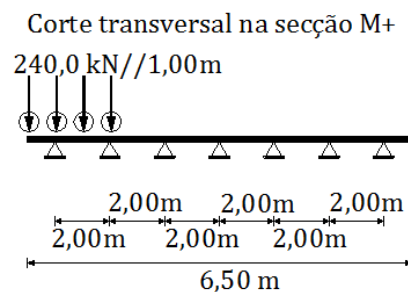
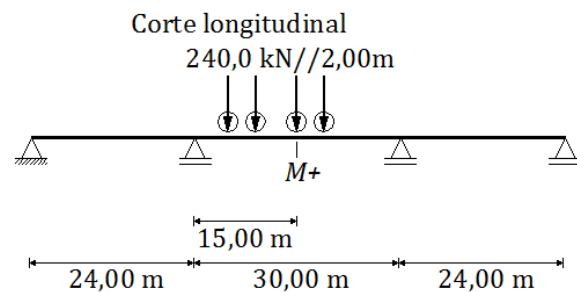


SATCC

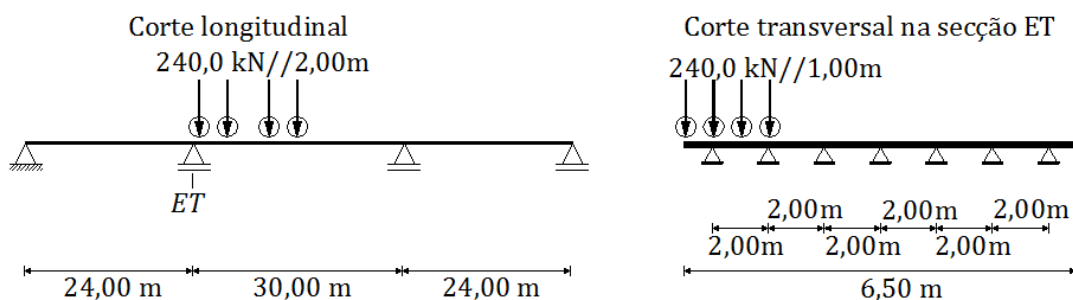
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

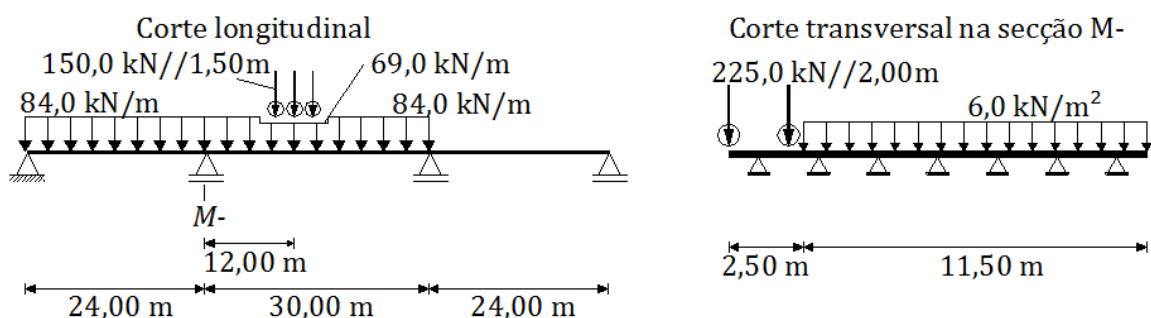


- Carregamento condicionante do esforço transverso

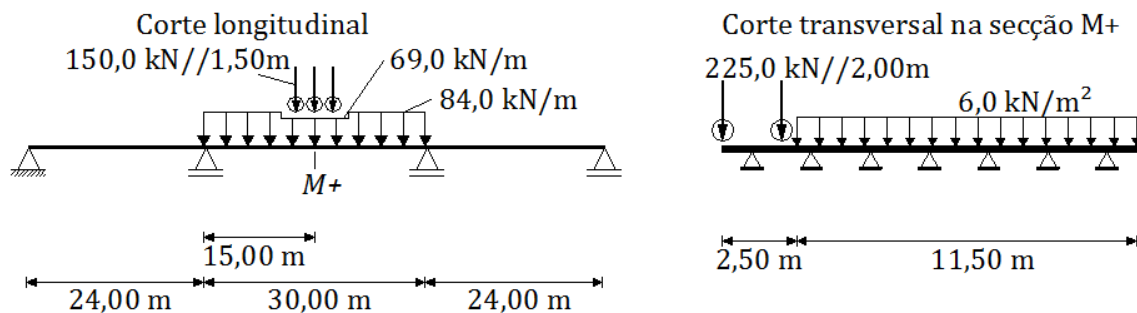


ABNT

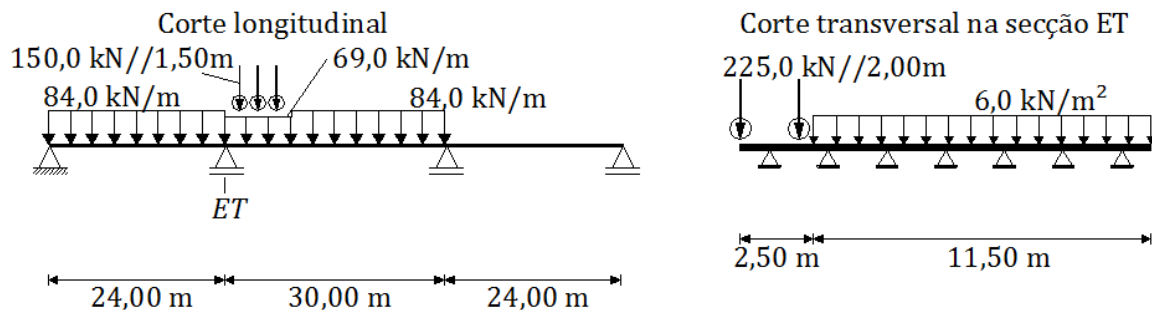
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo



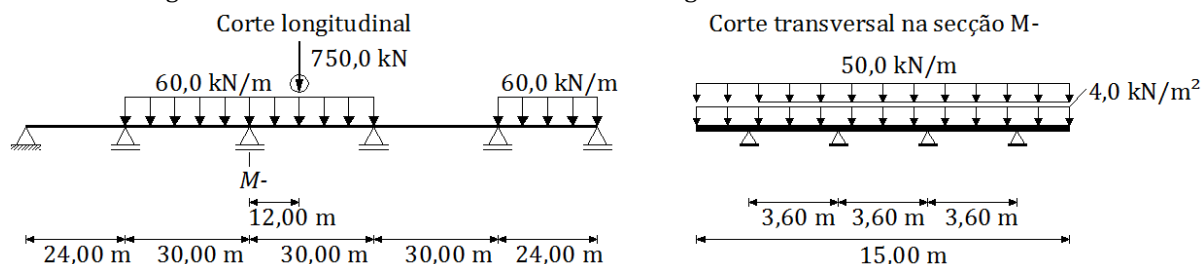
- Carregamento condicionante do esforço transverso



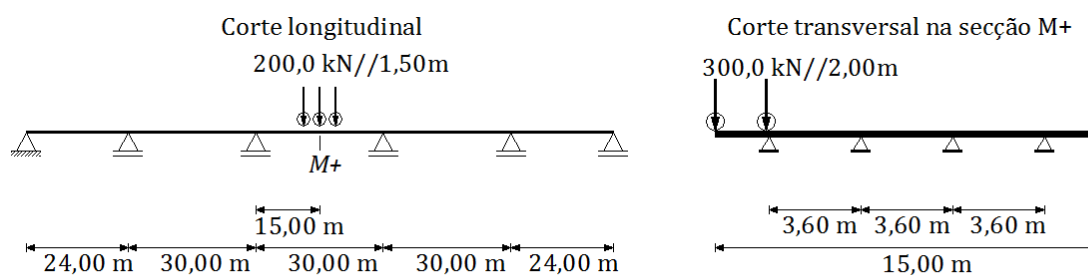
A1.5 – Caso de estudo 5

RSA

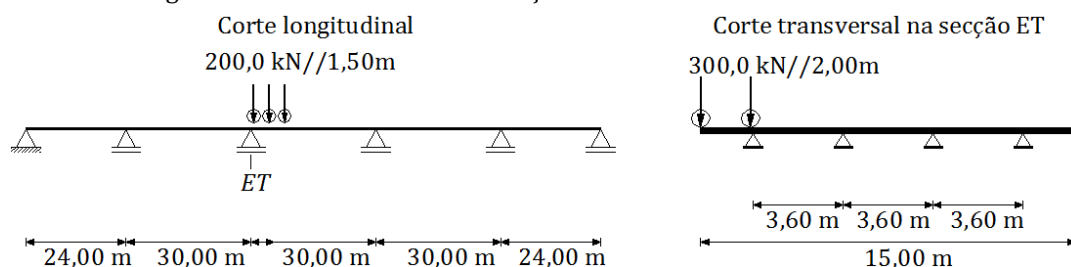
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

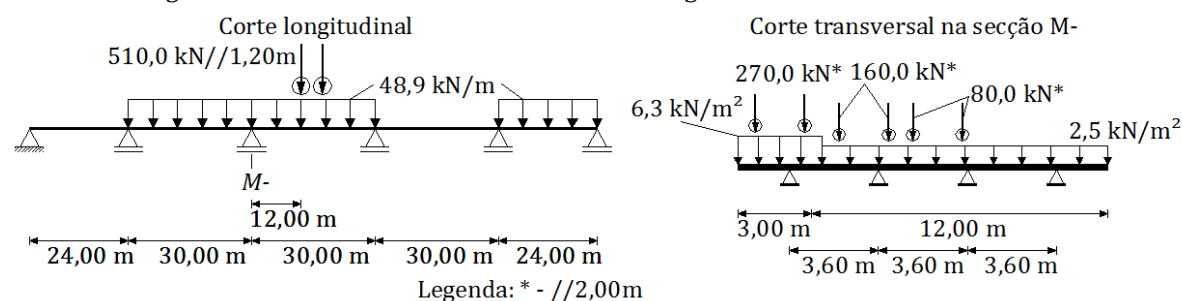


- Carregamento condicionante do esforço transverso

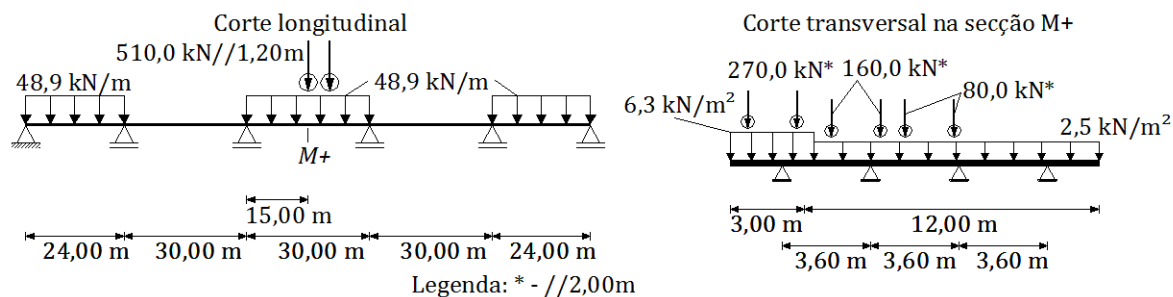


EC1

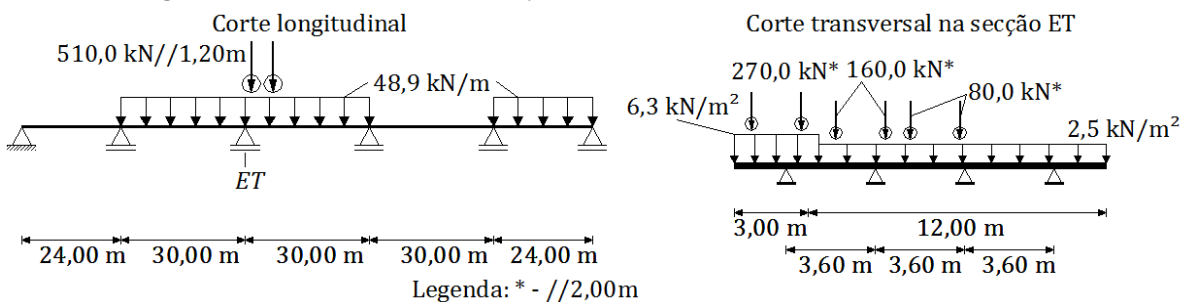
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

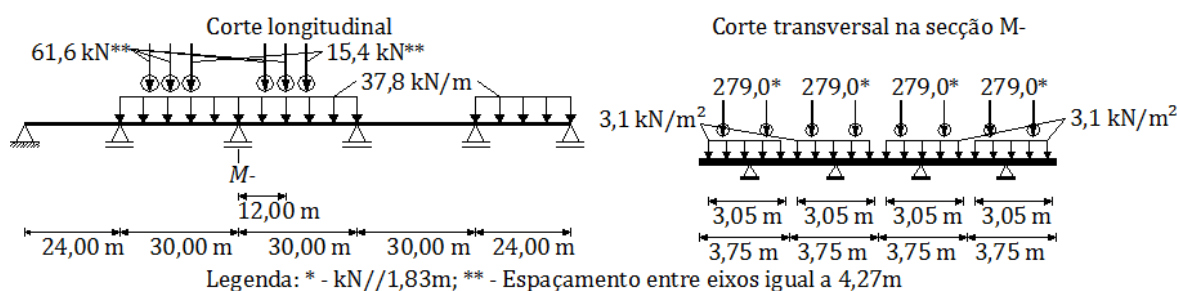


- Carregamento condicionante do esforço transverso

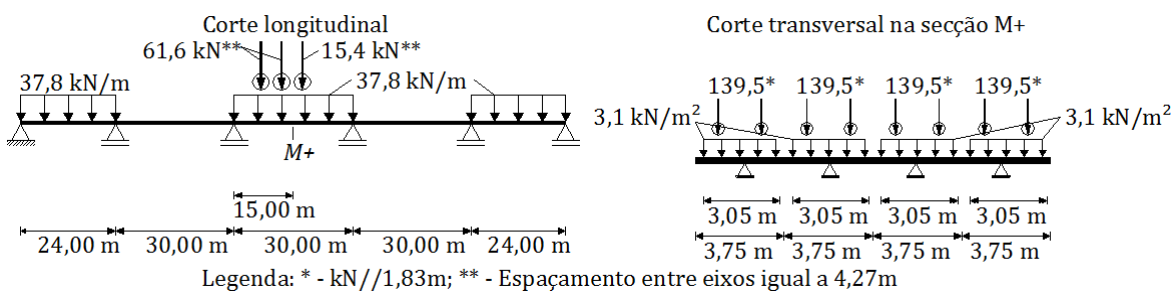


AASHTO

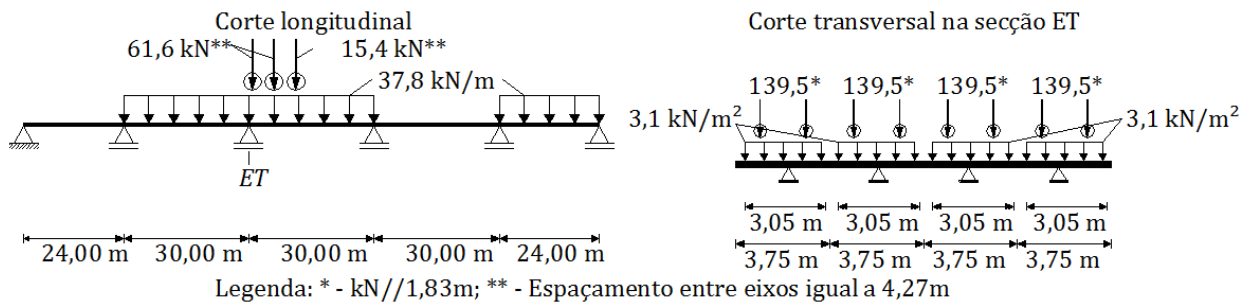
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

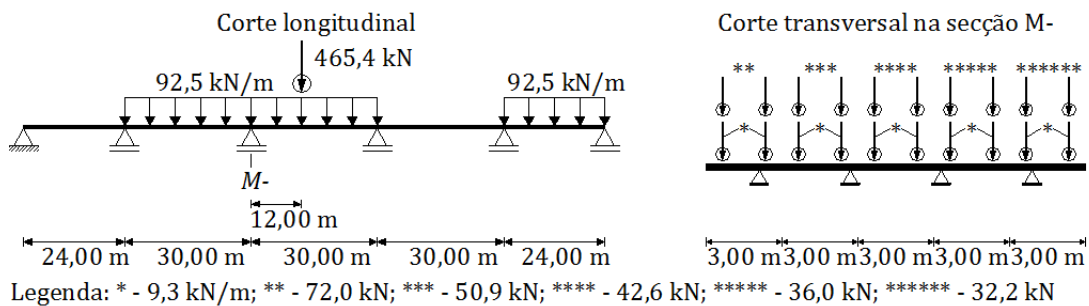


- Carregamento condicionante do esforço transverso

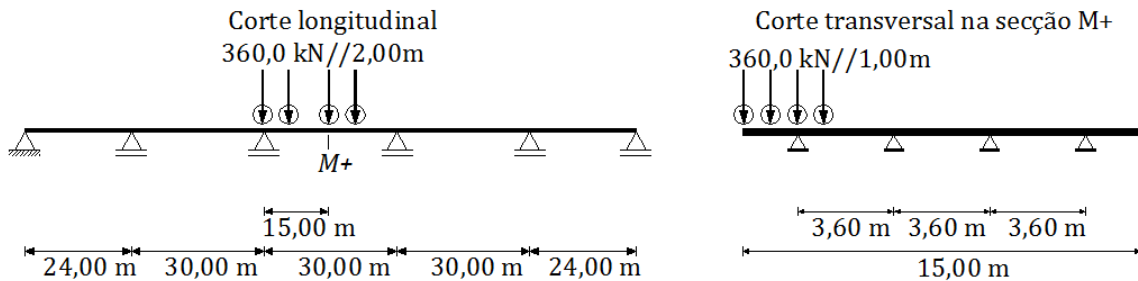


SATCC

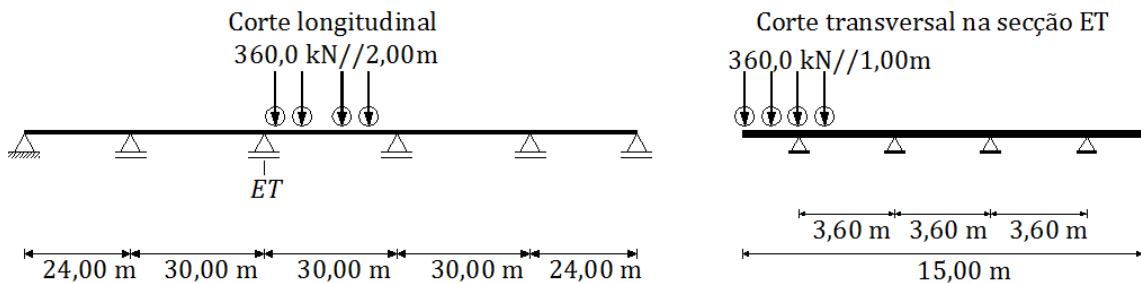
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo

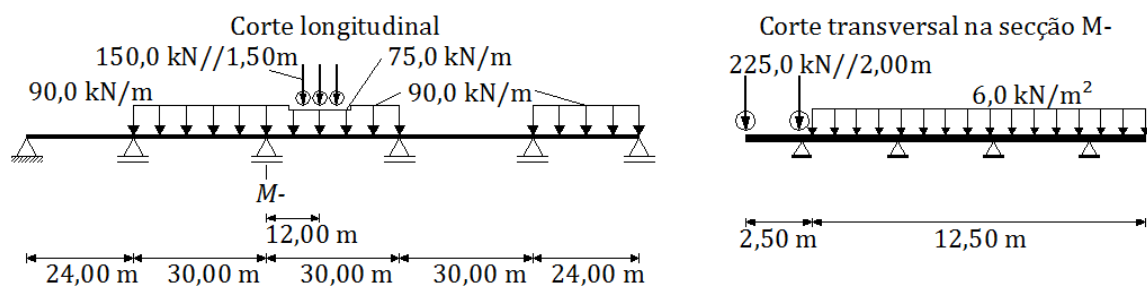


- Carregamento condicionante do esforço transverso

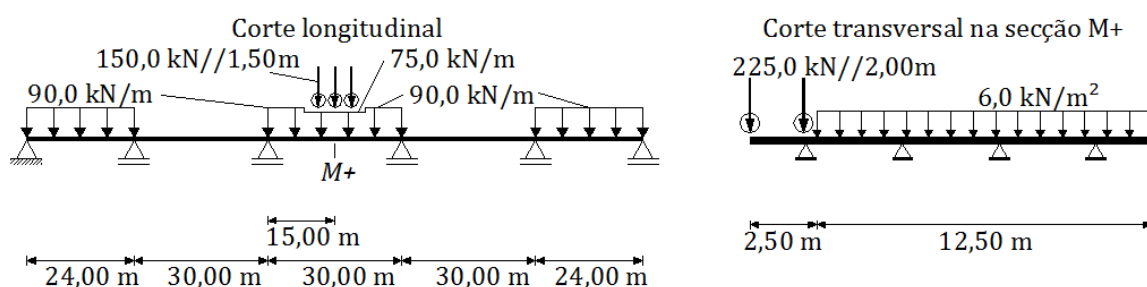


ABNT

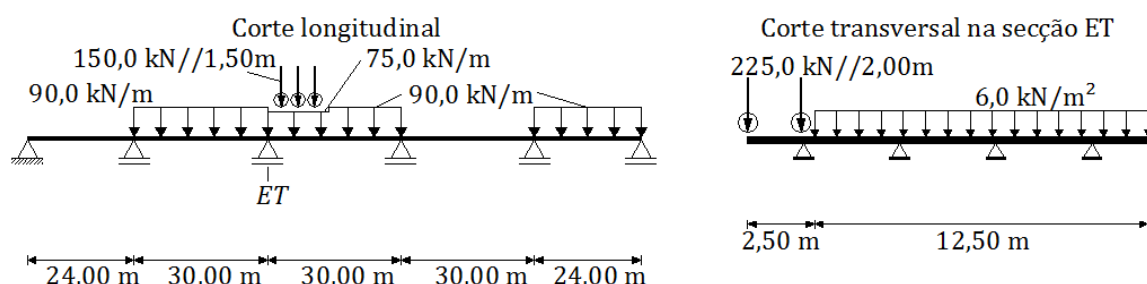
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo



- Carregamento condicionante do esforço transverso



Anexo A2

Representação dos carregamentos da análise transversal

Utilizaram-se as superfícies de influência de Homberg para os casos de estudo 1 e 2, que considerada a relação de espessuras de 1/1,5 (vão/apoio). Para os casos de estudo 3, 4 e 5 utilizaram-se, novamente, as superfícies de influência de Homberg, que considera espessura constante em todo o tabuleiro e a multiplicidade de vigas no tabuleiro.

Para a determinação dos momentos fletores provocados pelas subrecargas distribuídas recorreu-se a modelos de barra simulados no programa *Ftool*®. Para a secção de meio vão recorreu-se ao fator de encastramento parcial α , para ponderar os momentos resultantes. Enquanto que na secção de apoio considerou-se um encastramento perfeito, sendo o coeficiente α igual a 1.

Na seguinte fórmula está indicado a ponderação do coeficiente α .

$$\alpha = \frac{1}{1 + 0,6 \times \frac{I_{laje}}{J_v} \times \frac{L^2}{b}}$$

Em que:

I_{laje} – inércia da laje por metro; J_v – rigidez de torção da viga; L – comprimento do vão; b – distância entre vigas.

São apresentados apenas os esquemas dos carregamentos condicionantes de cada norma nas três secções analisadas, em cada caso de estudo. As dimensões das rodas são proporcionais com as dimensões do tabuleiro.

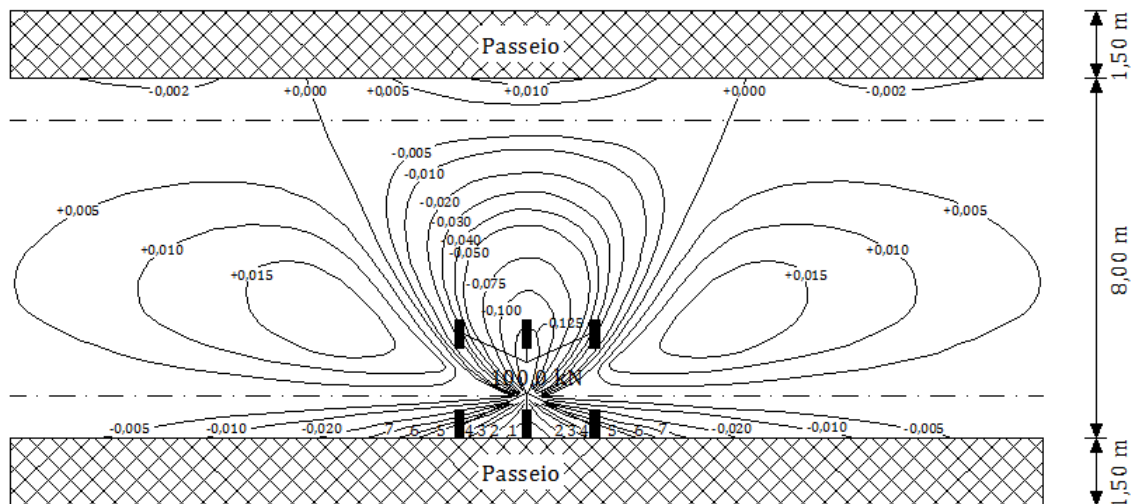
A2.1 – Caso de estudo 1

- Variante com 25,00 m de vão corrente

Nesta variante o coeficiente de encastramento parcial α toma o valor de 0,557. Este coeficiente só é tido em conta nos resultados dos modelos de barra obtidos pelo programa *Ftool*®, para a secção de meio vão. Na secção de apoio toma-se os valores obtidos do modelo perfeitamente encastrado.

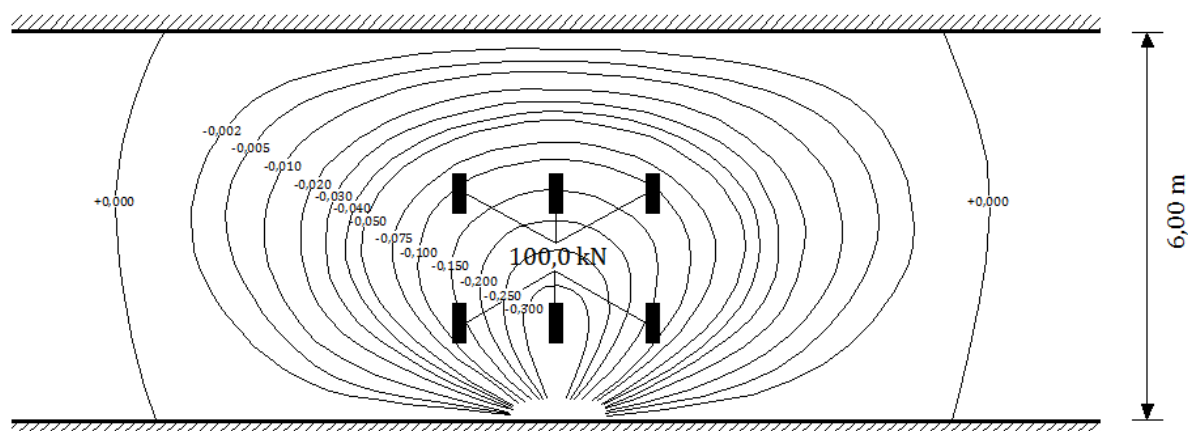
RSA

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.



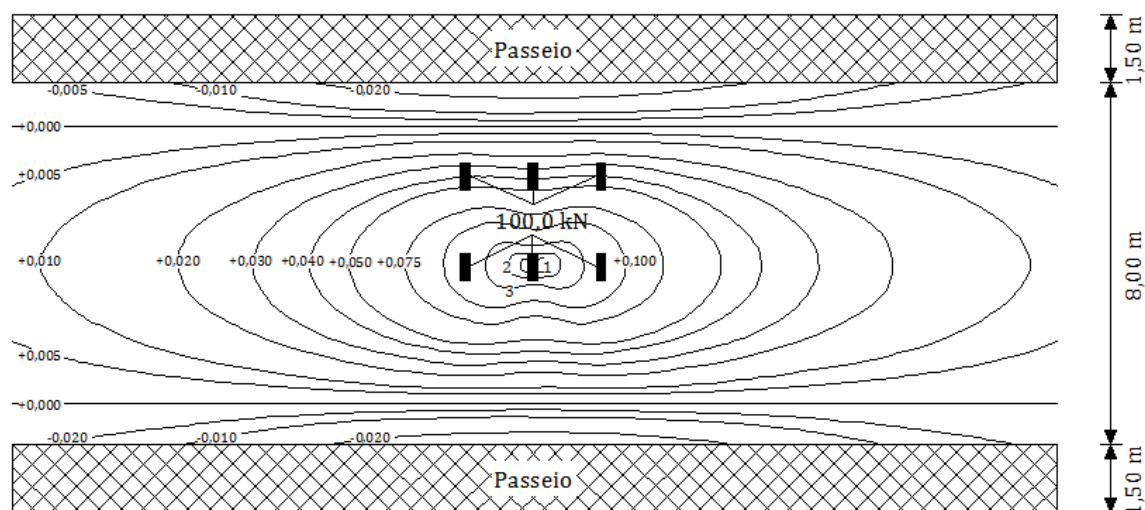
Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Secção de apoio;
- Veículo tipo.



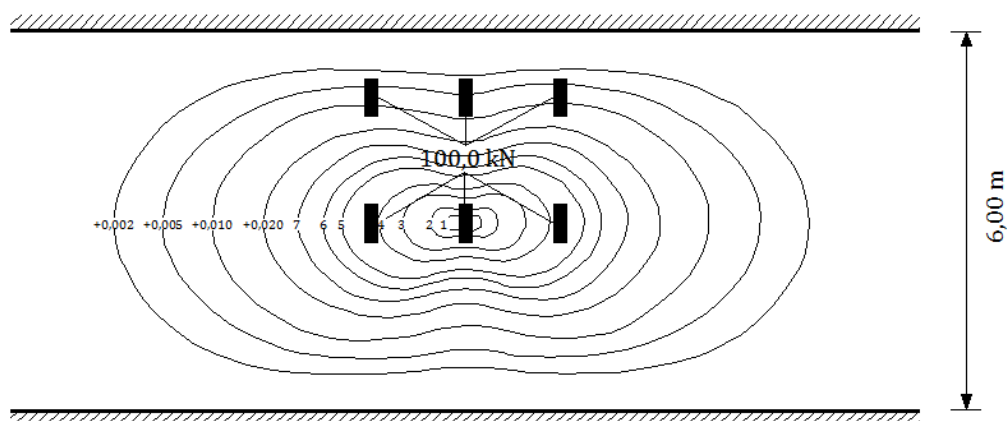
- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas

- Secção de meio vão;
- Veículo tipo.



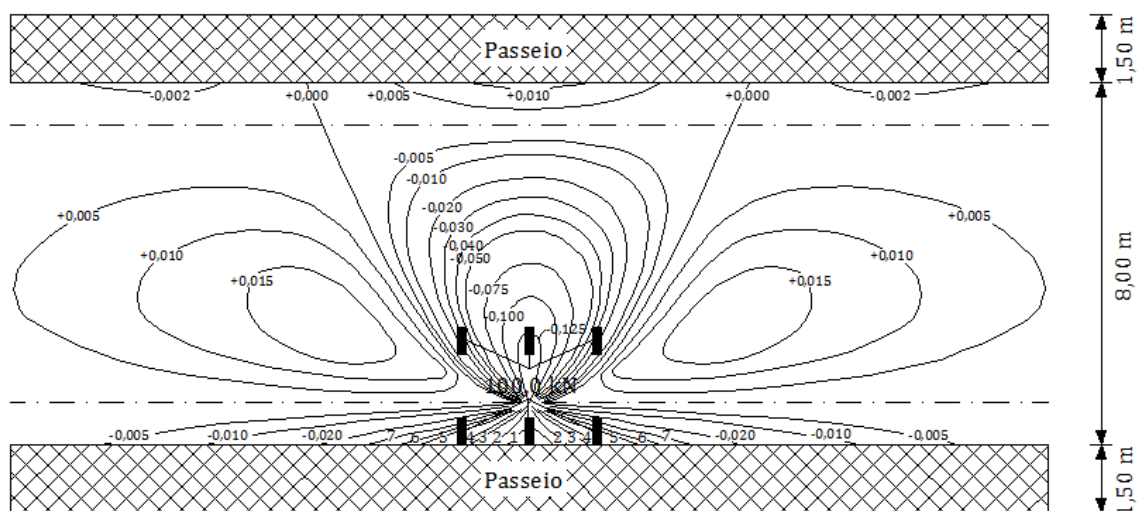
Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150.

- Secção de apoio;
- Veículo tipo.



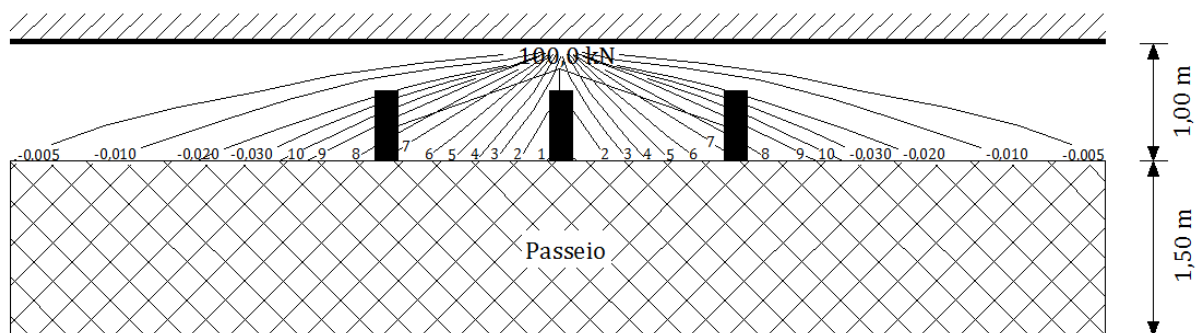
Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: 0,030.

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola
- Secção de meio vão;
- Veículo tipo.



Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

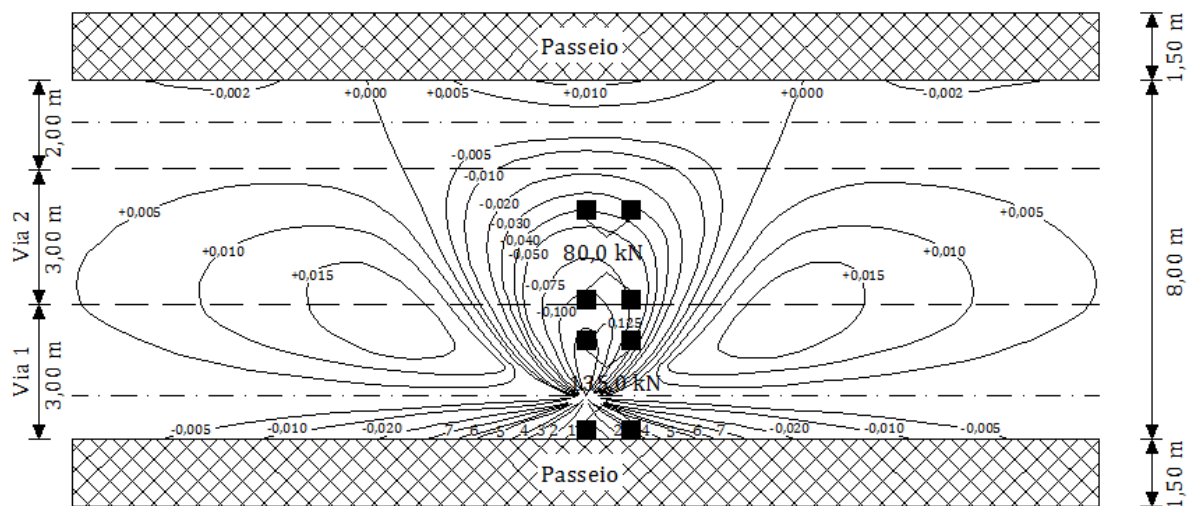
- Secção de apoio;
- Veículo tipo.



Legenda – 1: +0,400; 2: +0,350; 3: +0,300; 4: +0,250; 5: +0,200; 6: +0,150; 7: +0,100; 8: +0,075; 9: +0,050; 10: +0,040.

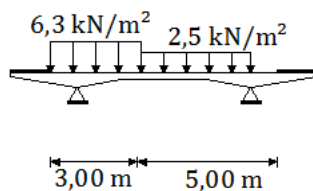
EC1

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS



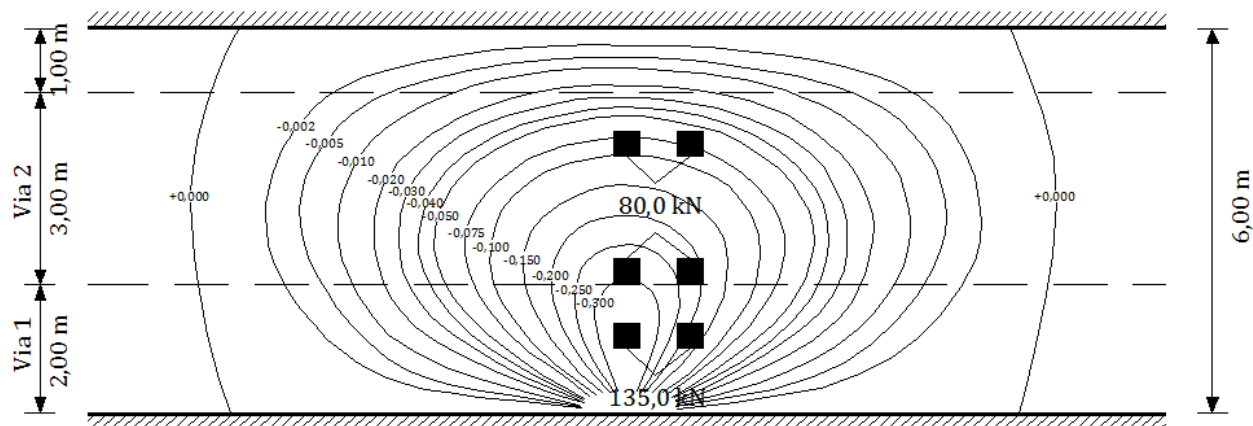
Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL

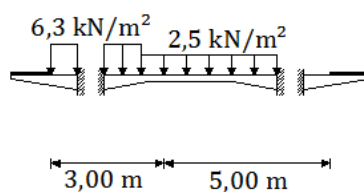


– Secção de apoio;

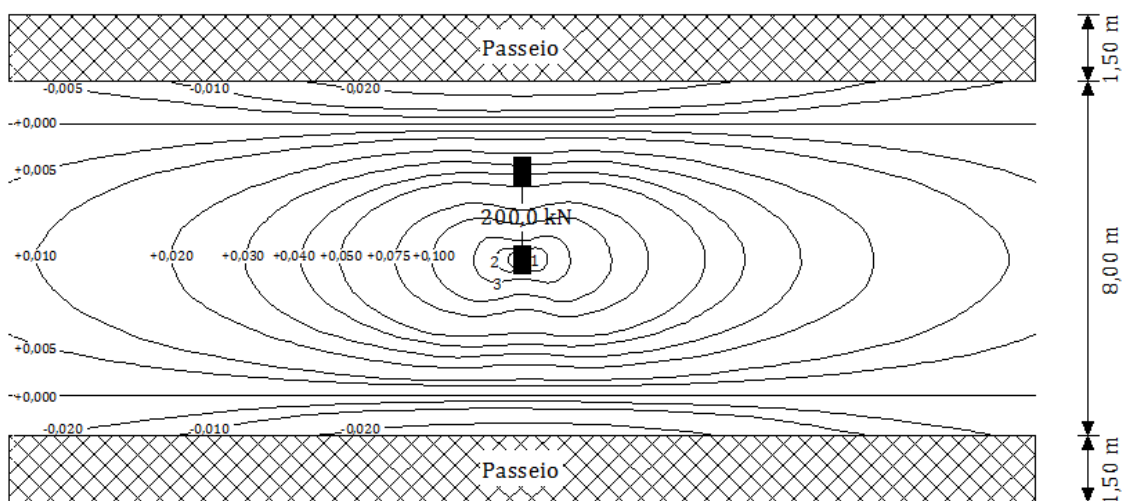
- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS



- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL

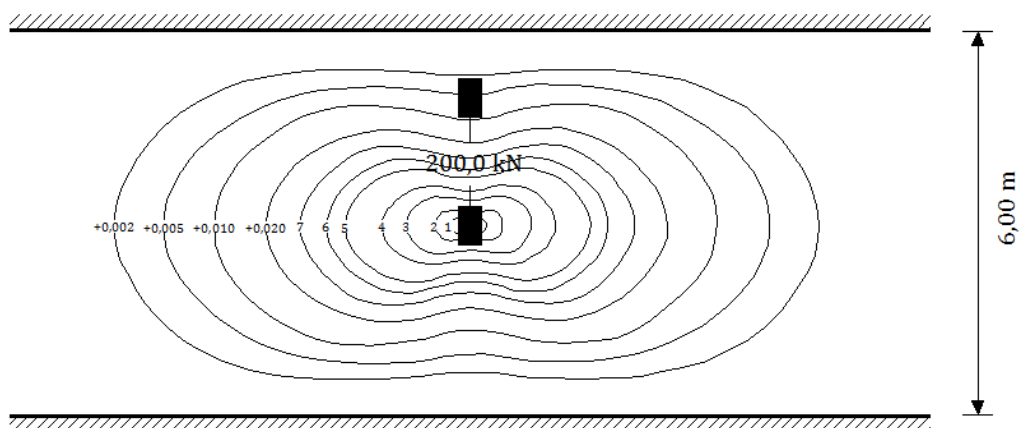


- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga LM2.



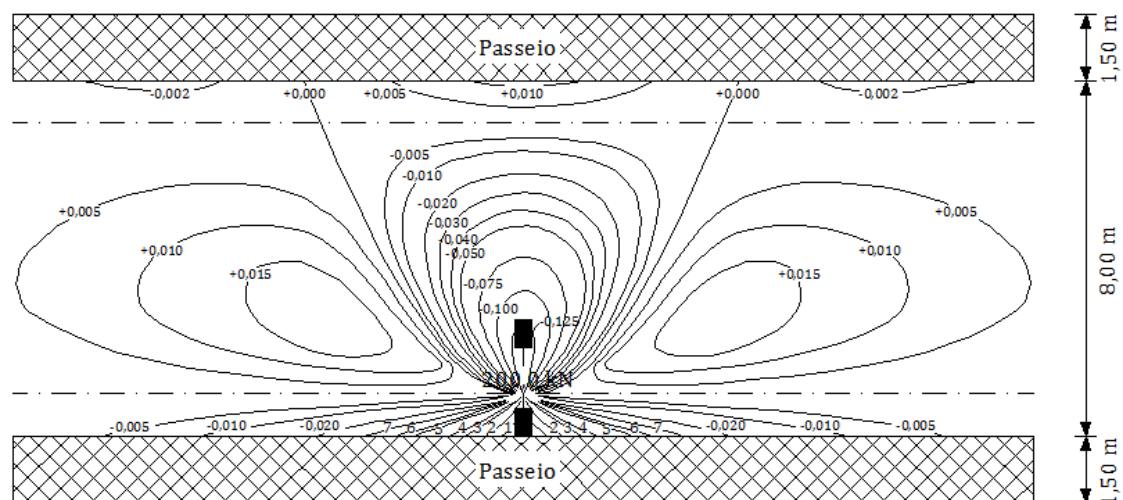
Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150.

- Secção de apoio;
- Modelo de sobrecarga LM2.



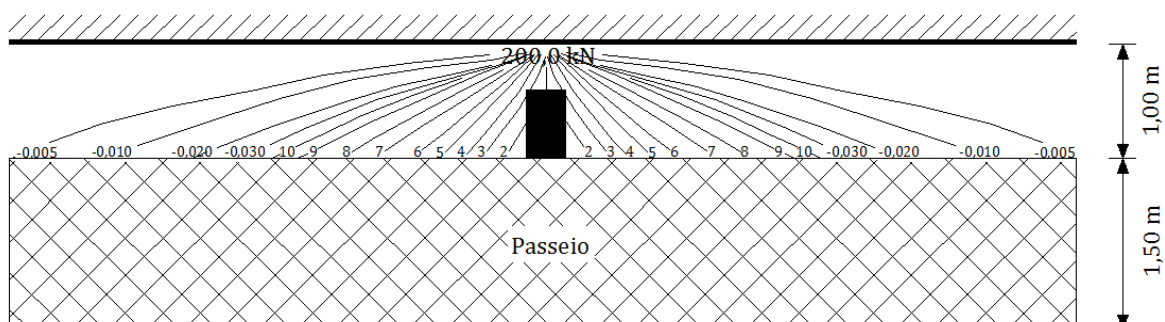
Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: 0,030.

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga LM2.



Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

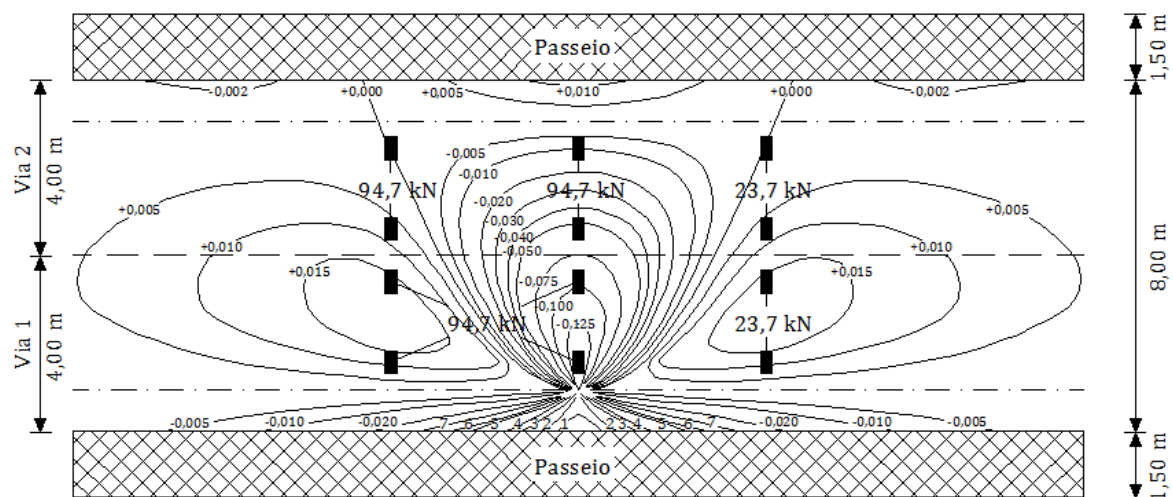
- Secção de apoio;
 - Modelo de sobrecarga LM2.



Legenda – 1: +0,400; 2: +0,350; 3: +0,300; 4: +0,250; 5: +0,200; 6: +0,150; 7: +0,100; 8: +0,075; 9: +0,050; 10: +0,040.

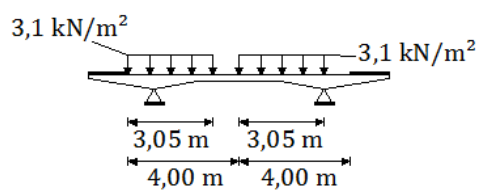
AASHTO

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo HS20 – 44.

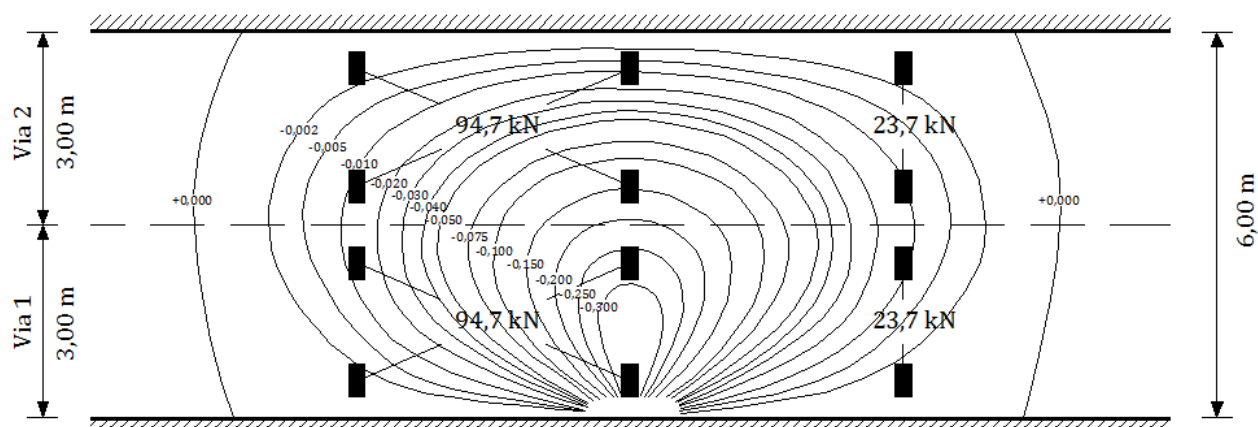


Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

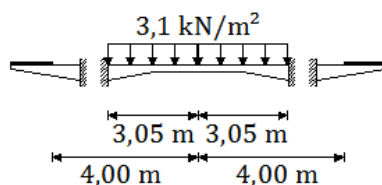
- Sobrecarga uniforme.



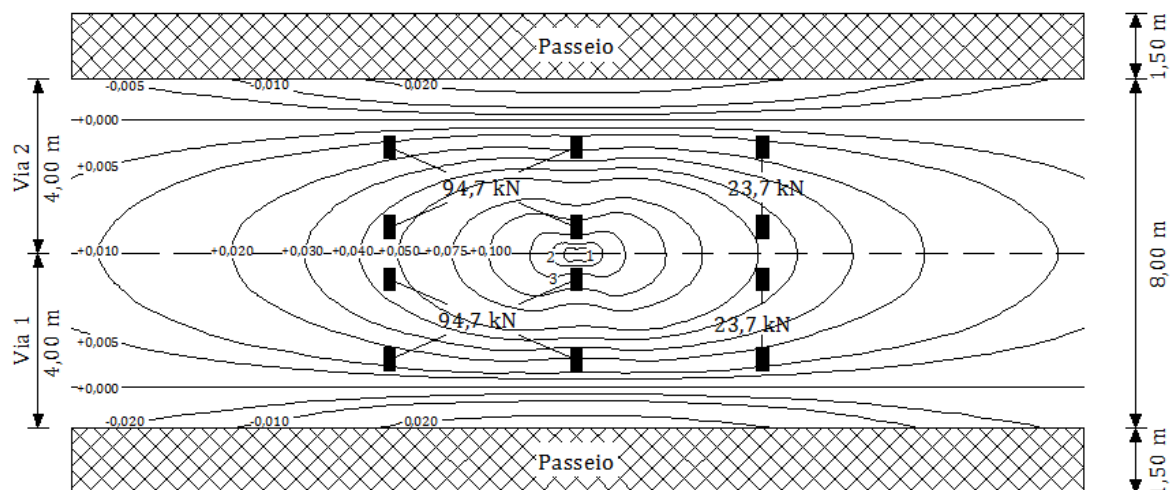
- Secção de apoio;
 - Veículo HS20 – 44.



- Sobrecarga uniforme.

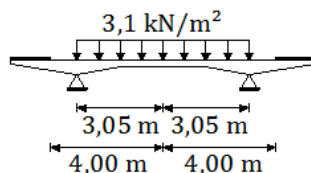


- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo HS20 – 44.

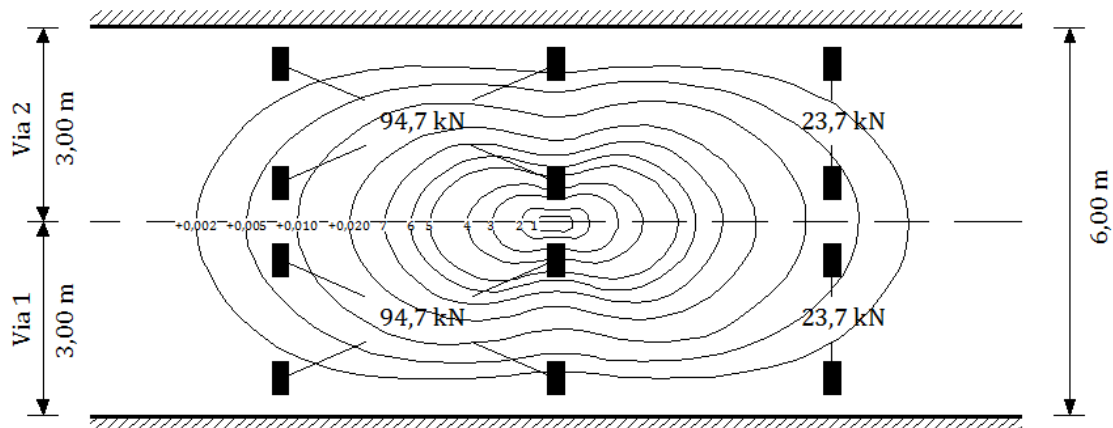


Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150.

- Sobrecarga uniforme.

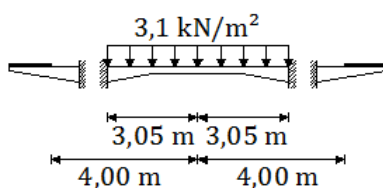


- Secção de apoio;
- Veículo HS20 – 44.

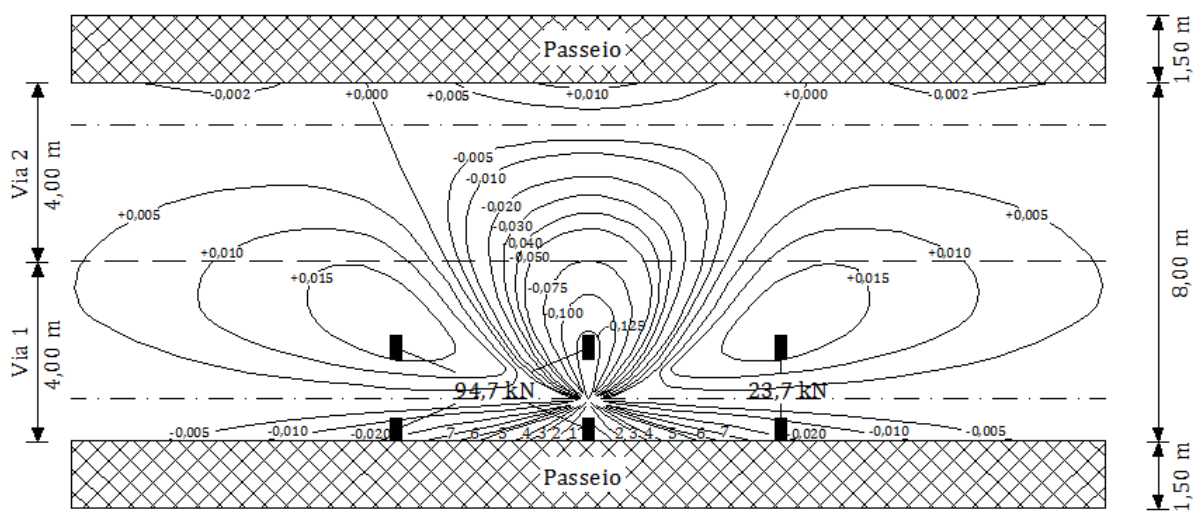


Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: 0,030.

- Sobrecarga uniforme.

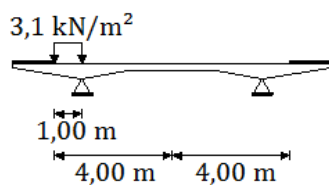


- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola
 - Secção de meio vão;
 - Veículo HS20 – 44.

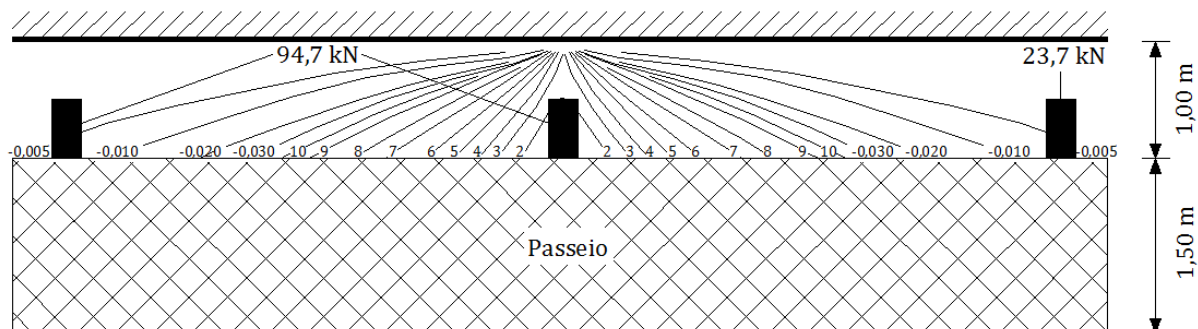


Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Sobrecarga uniforme.

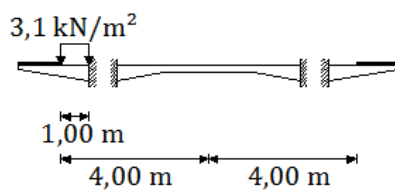


- Secção de apoio;
 - Veículo HS20 – 44.



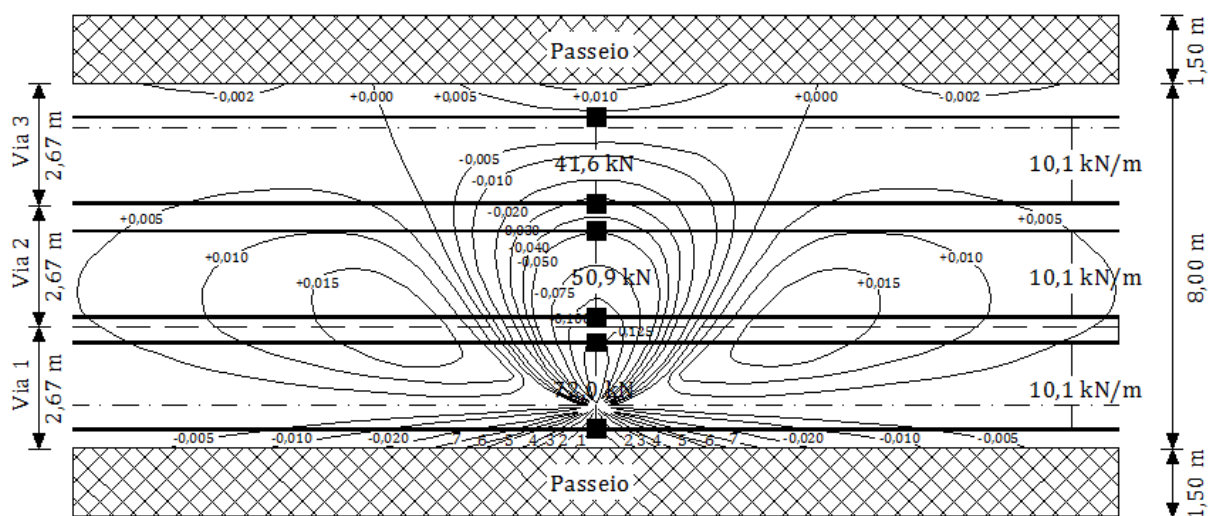
Legenda – 1: +0,400; 2: +0,350; 3: +0,300; 4: +0,250; 5: +0,200; 6: +0,150; 7: +0,100; 8: +0,075; 9: +0,050; 10: +0,040.

- Sobrecarga uniforme.



SATCC

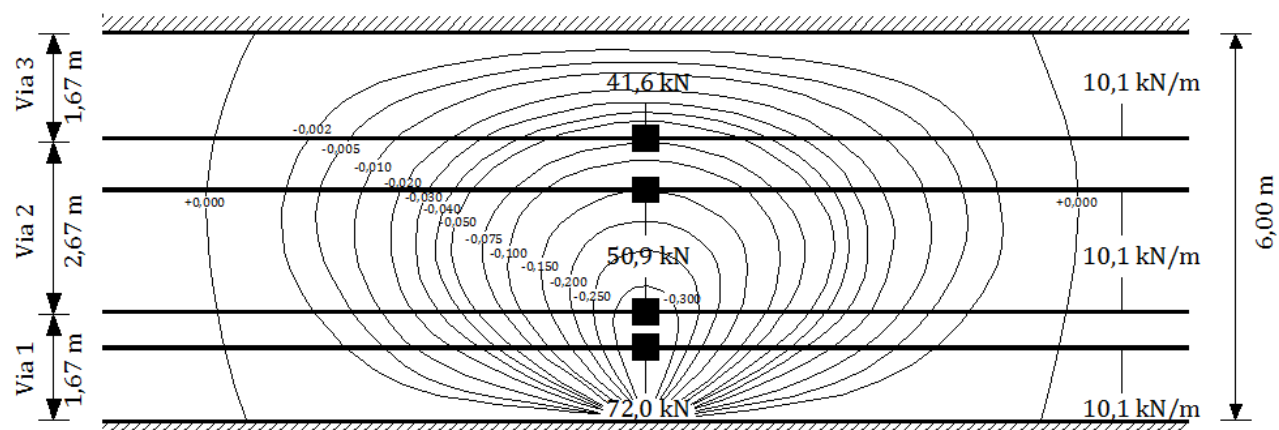
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga NA – (1) + (2).



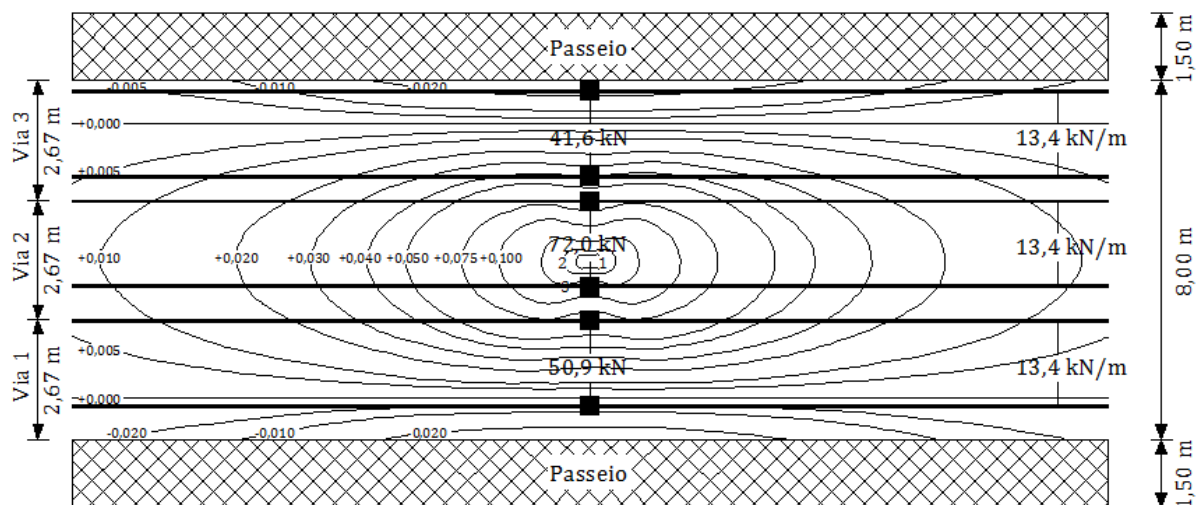
Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Secção de apoio;

- Modelo de sobrecarga NA – (1) + (2).

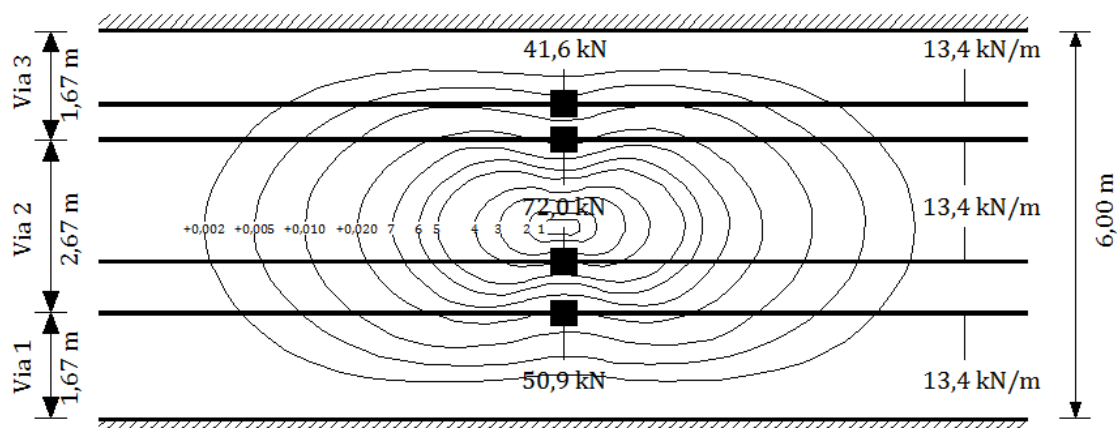


- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga NA – (1) + (2).



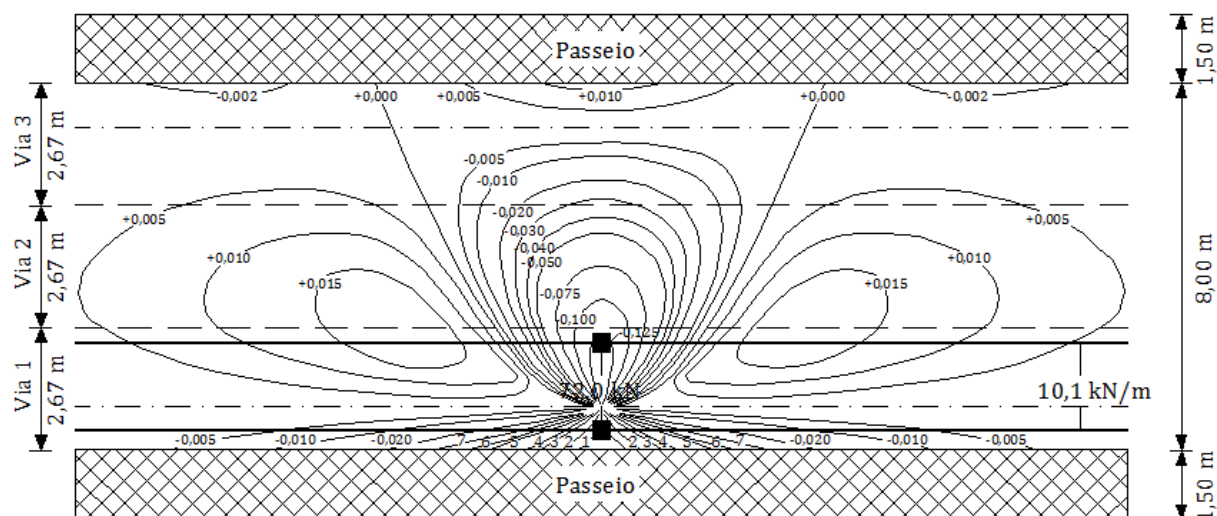
Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150.

- Secção de apoio;
- Modelo de sobrecarga NA – (1) + (2).



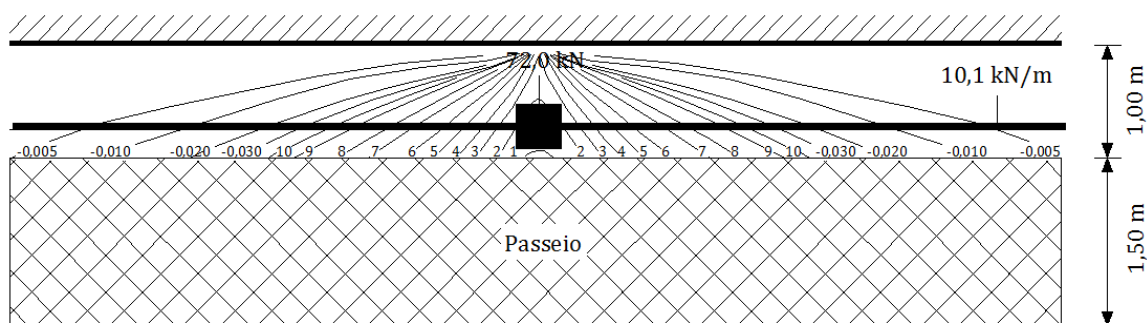
Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: 0,030.

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga NA – (1) + (2).



Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

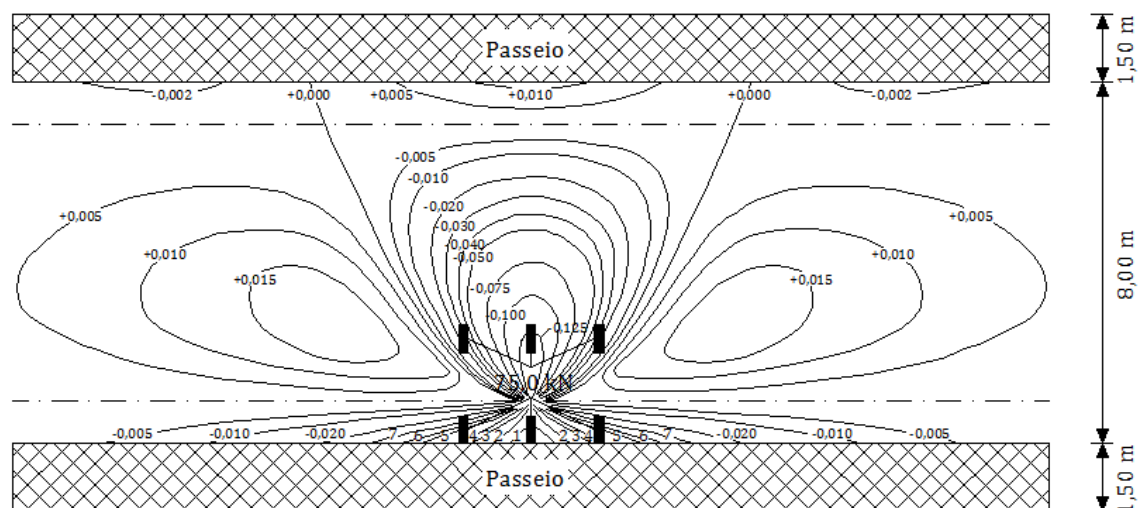
- Secção de apoio;
 - Modelo de sobrecarga NA – (1) + (2).



Legenda – 1: +0,400; 2: +0,350; 3: +0,300; 4: +0,250; 5: +0,200; 6: +0,150; 7: +0,100; 8: +0,075; 9: +0,050; 10: +0,040.

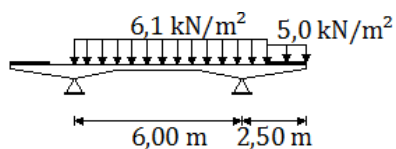
ABNT

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.

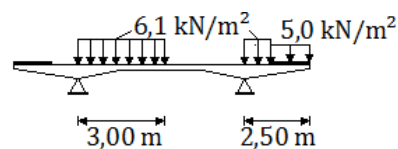


Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Sobrecarga uniforme.

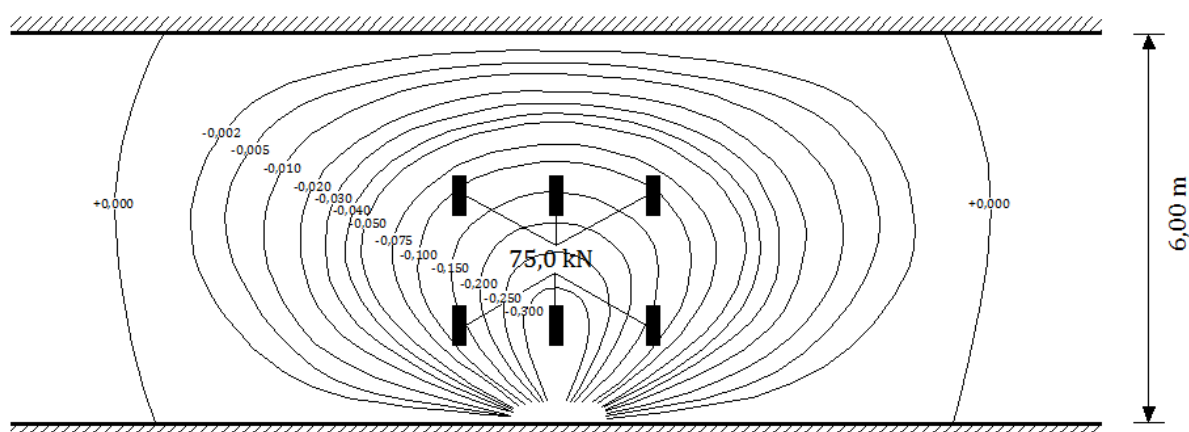


Secção sem veículo

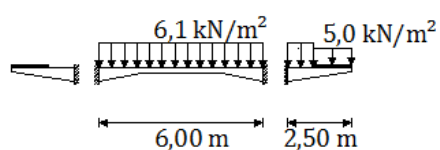


Secção com veículo

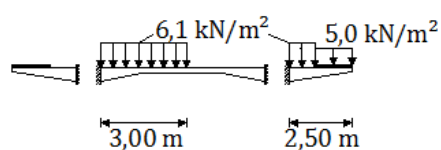
- Secção de apoio;
 - Veículo tipo.



- Sobrecarga uniforme.



Secção sem veículo

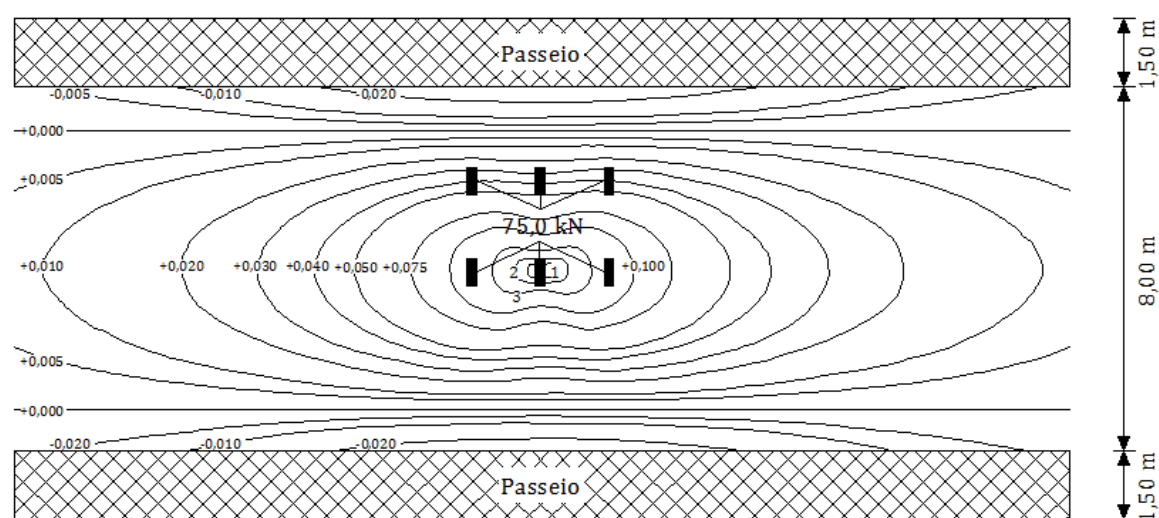


Secção com veículo

- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas

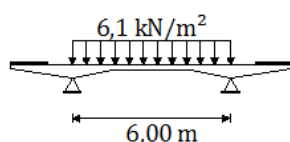
– Secção de meio vão;

- Veículo tipo.

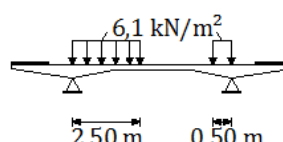


Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150.

- Sobrecarga uniforme.

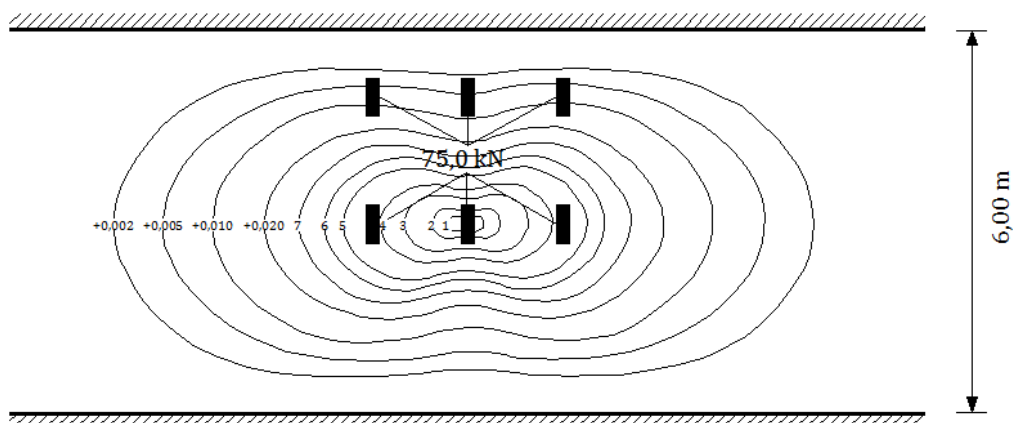


Secção sem veículo



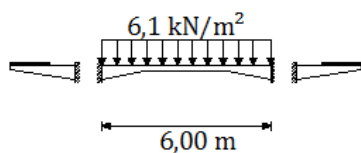
Secção com veículo

- Secção de apoio;
- Veículo tipo.

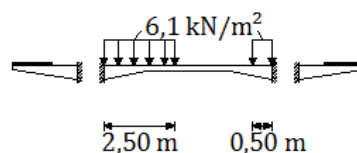


Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: 0,030.

- Sobrecarga uniforme.



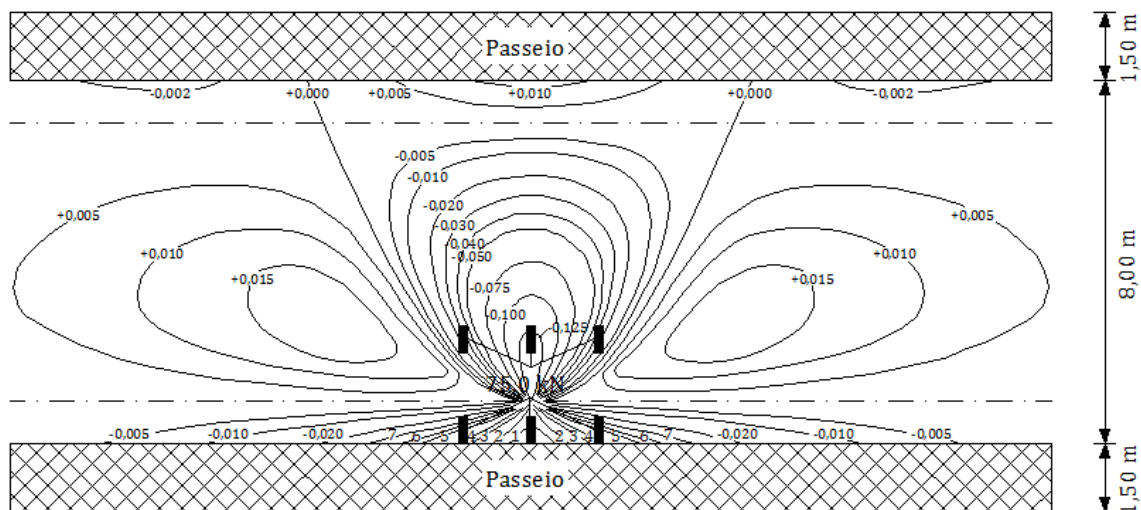
Secção sem veículo



Secção com veículo

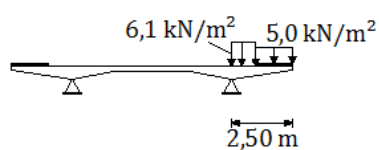
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola

- Secção de meio vão;
- Veículo tipo.

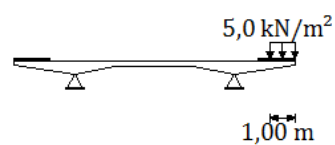


Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Sobrecarga uniforme.



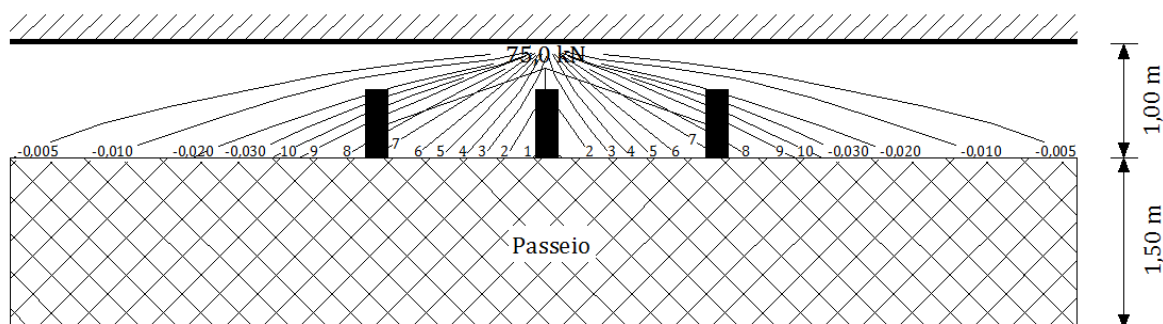
Secção sem veículo



Secção com veículo

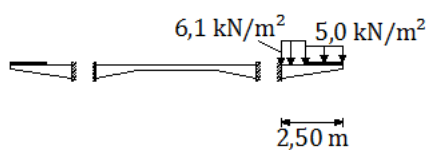
– Secção de apoio;

- Veículo tipo.

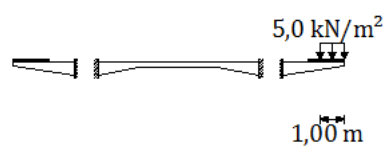


Legenda – 1: +0,400; 2: +0,350; 3: +0,300; 4: +0,250; 5: +0,200; 6: +0,150; 7: +0,100; 8: +0,075; 9: +0,050; 10: +0,040.

- Sobrecarga uniforme.



Secção sem veículo



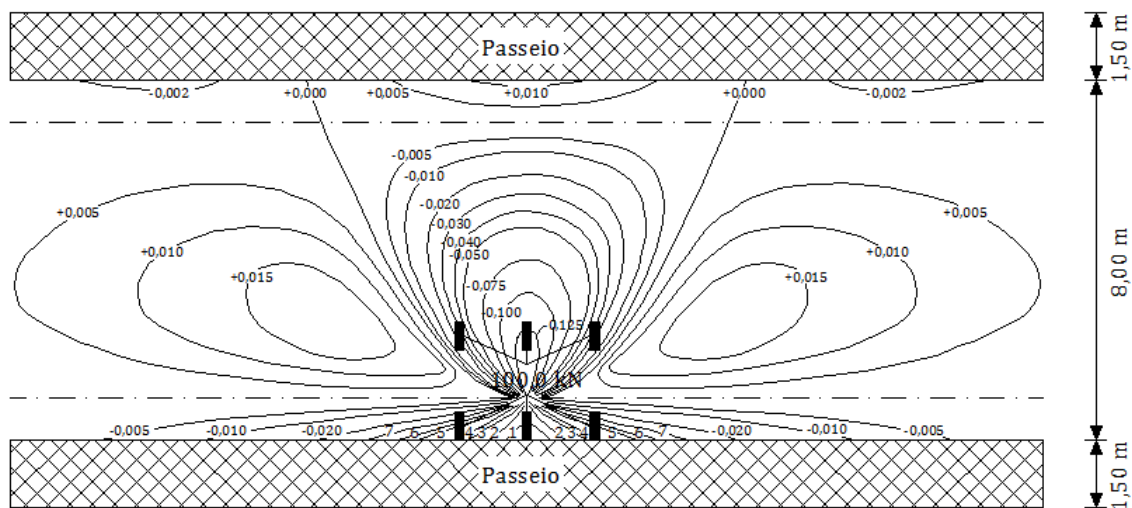
Secção com veículo

- Variante com 40,00 m de vão corrente

Nesta variante o coeficiente de encastramento parcial α toma o valor de 0,411. Este coeficiente só é tido em conta nos resultados dos modelos de barra obtidos pelo programa Ftool®, para a secção de meio vão. Na secção de apoio toma-se os valores obtidos do modelo perfeitamente encastrado.

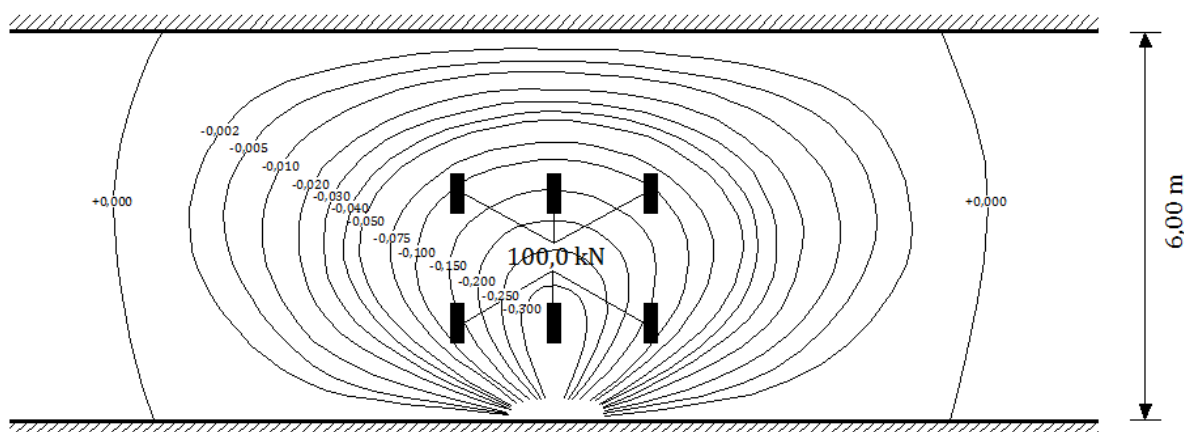
RSA

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.

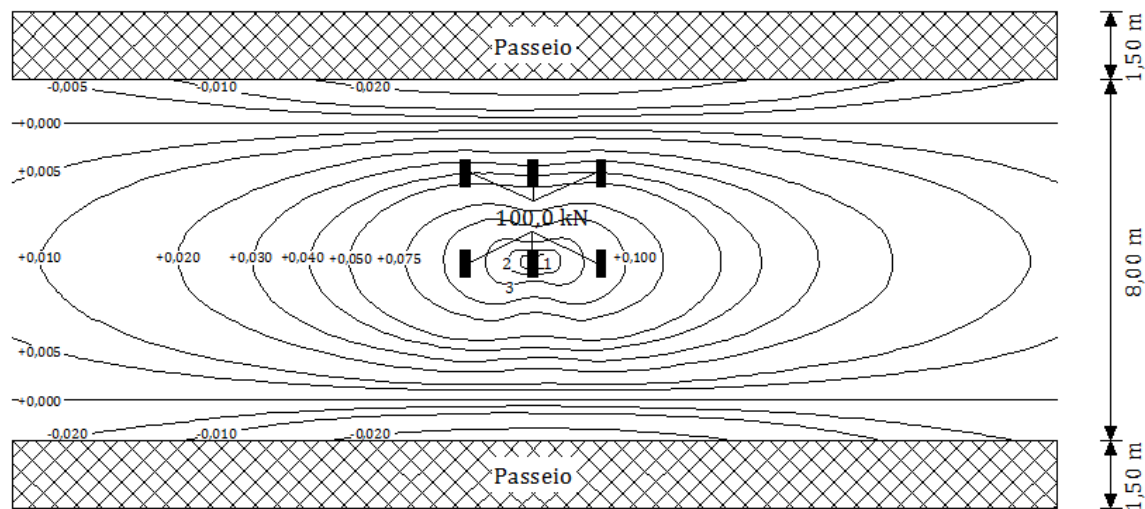


Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Secção de apoio;
 - Veículo tipo.

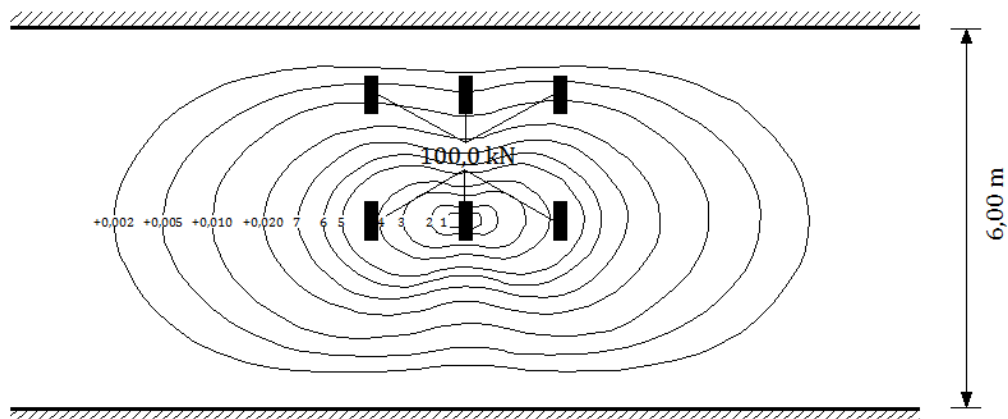


- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.



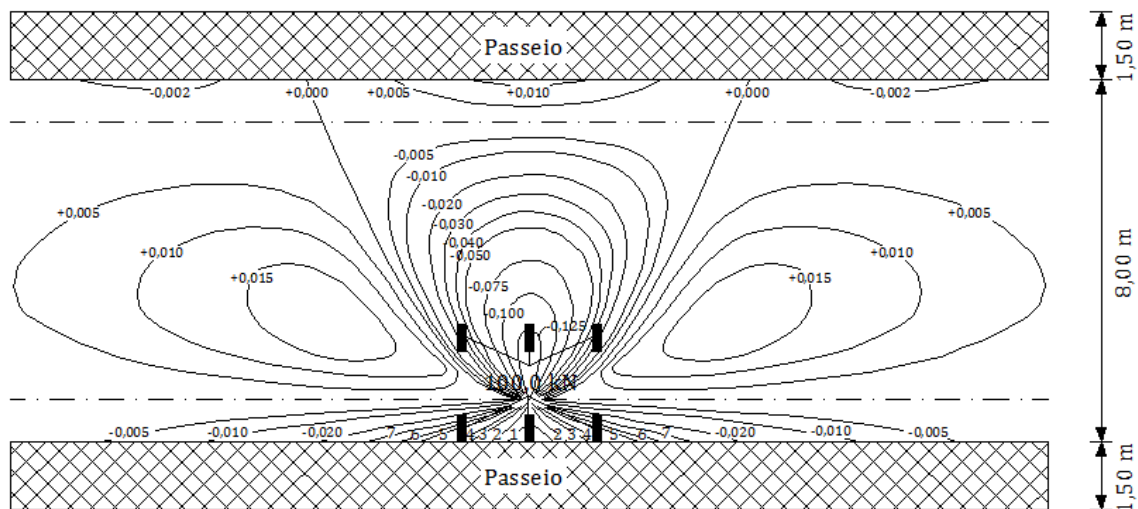
Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150.

- Secção de apoio;
- Veículo tipo.



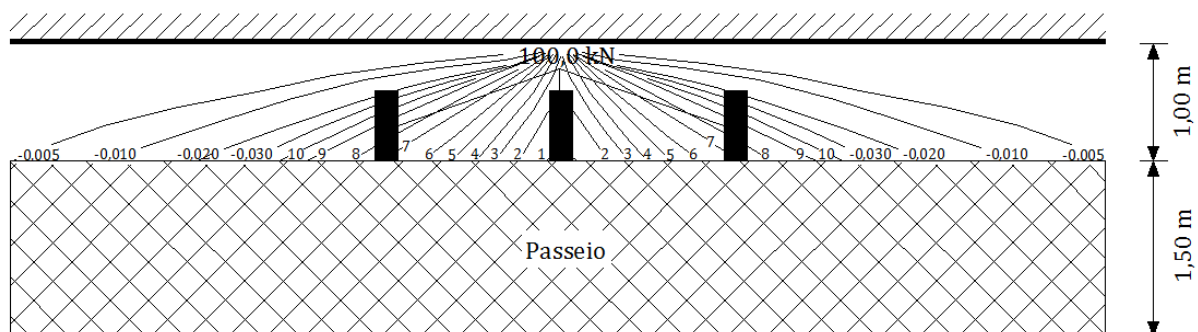
Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: 0,030.

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.



Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

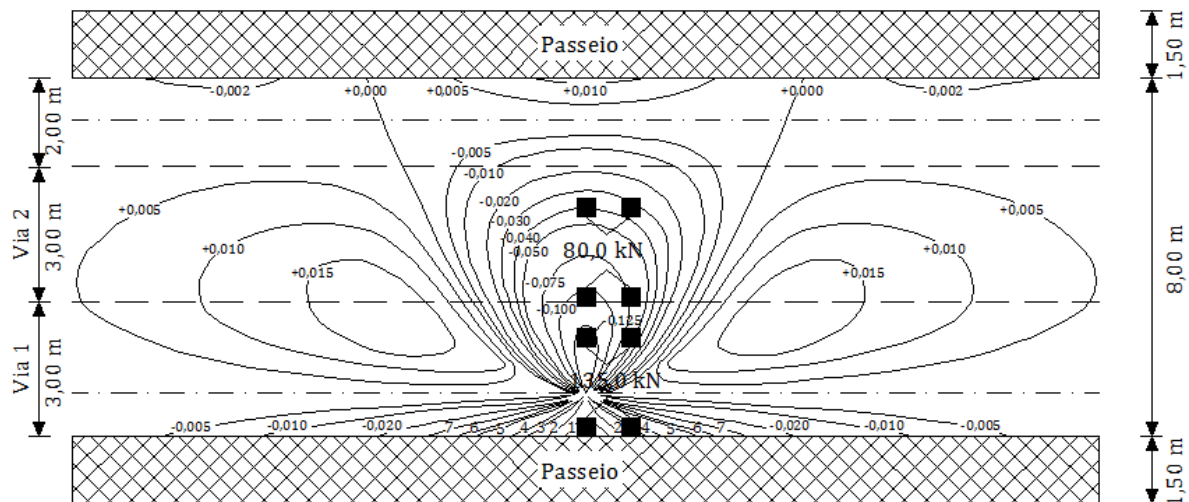
- Secção de apoio;
 - Veículo tipo.



Legenda – 1: +0,400; 2: +0,350; 3: +0,300; 4: +0,250; 5: +0,200; 6: +0,150; 7: +0,100; 8: +0,075; 9: +0,050; 10: +0,040.

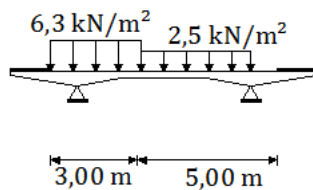
EC1

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS



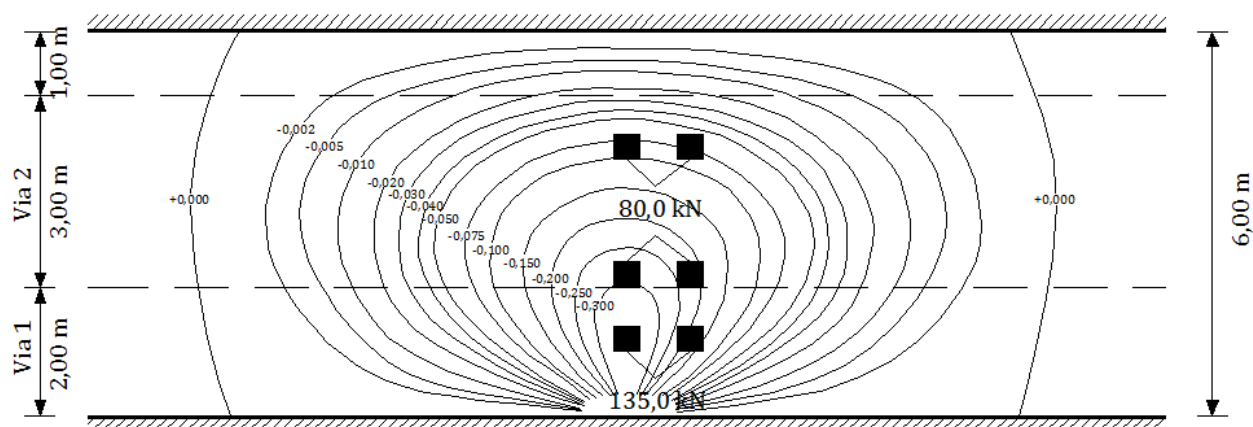
Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL

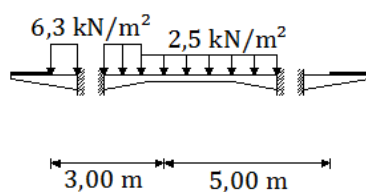


– Secção de apoio;

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS

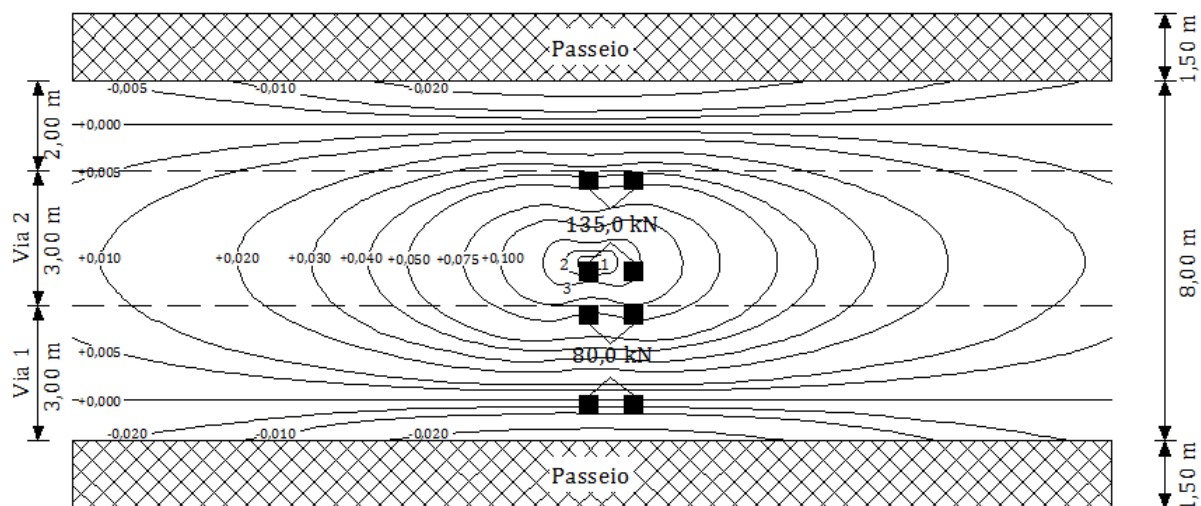


- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL



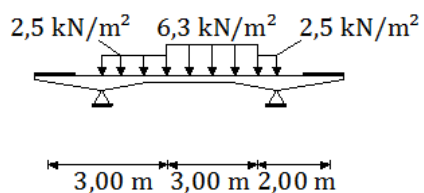
- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS



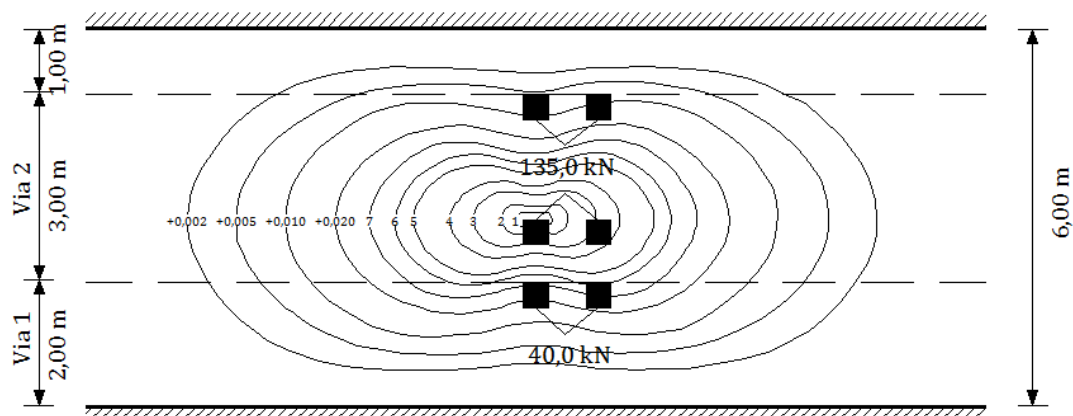
Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150.

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL



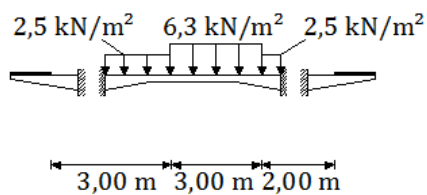
- Secção de apoio;

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS



Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: 0,030.

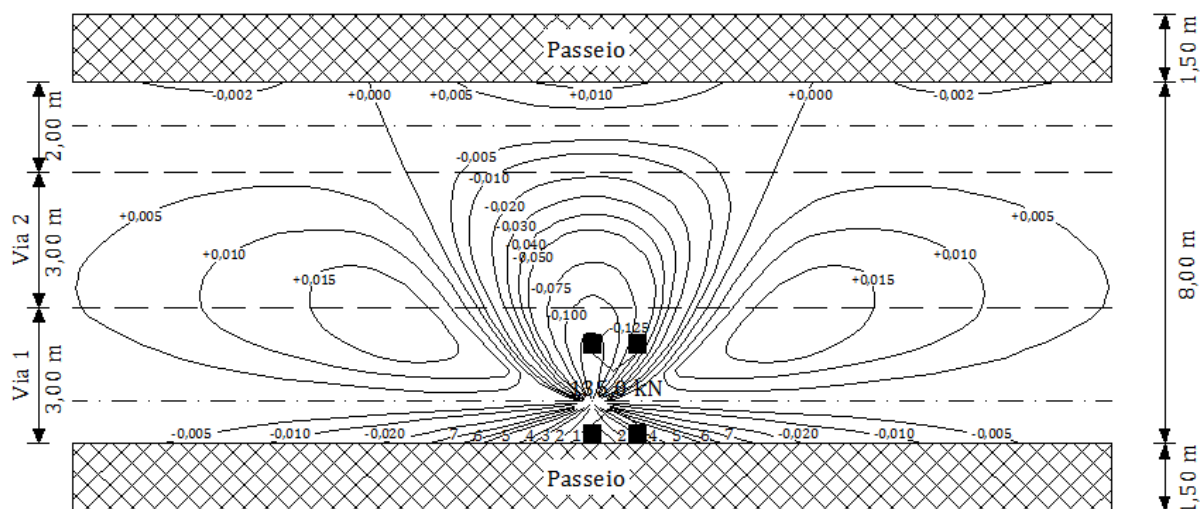
- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL



- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola

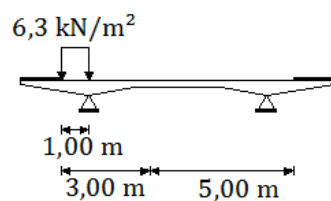
– Secção de meio vão;

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS



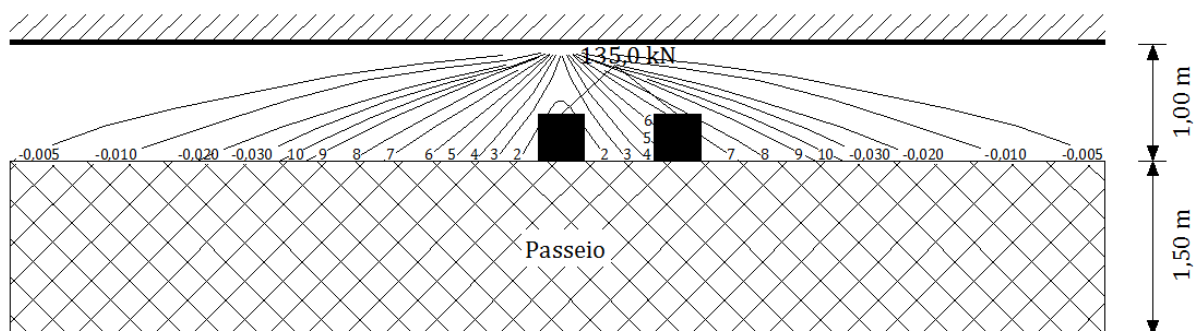
Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL



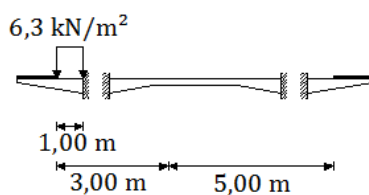
– Secção de apoio;

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS



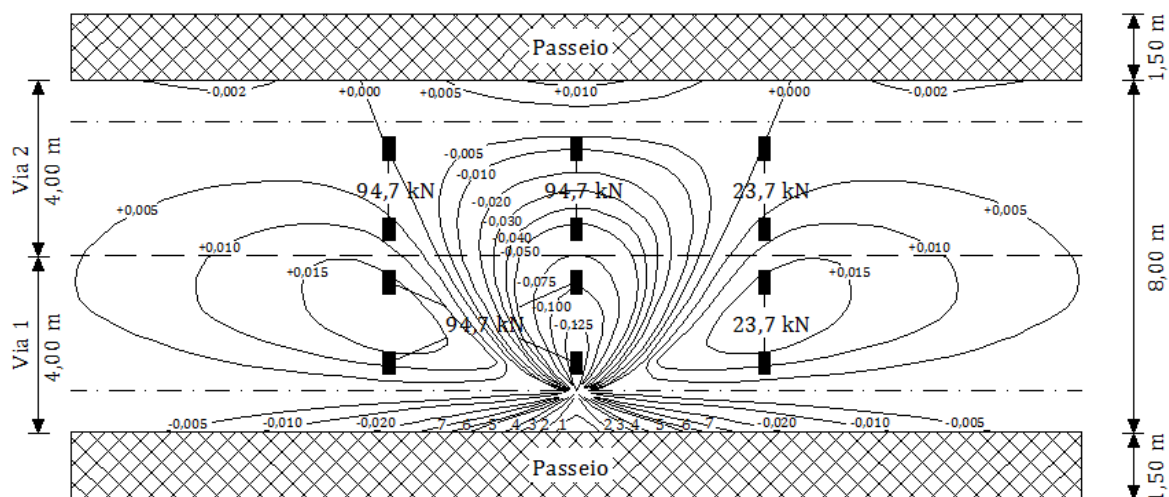
Legenda – 1: +0,400; 2: +0,350; 3: +0,300; 4: +0,250; 5: +0,200; 6: +0,150; 7: +0,100; 8: +0,075; 9: +0,050; 10: +0,040.

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL



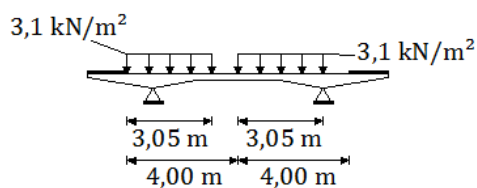
AASHTO

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
– Secção de meio vão;
 - Veículo HS20 – 44.

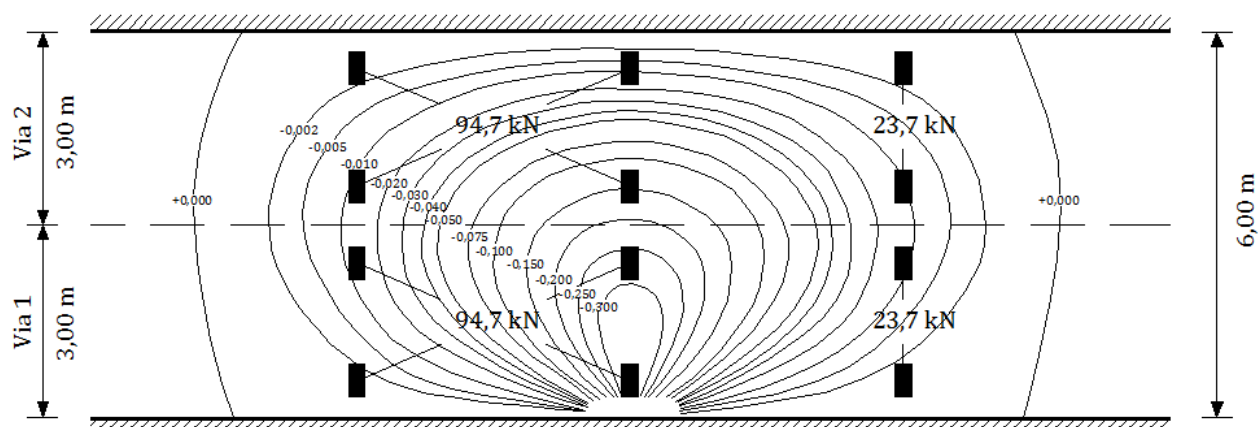


Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

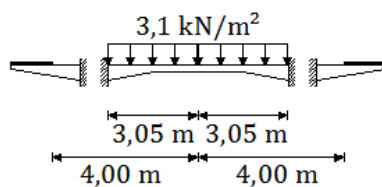
- Sobrecarga uniforme.



- Secção de apoio;
- Veículo HS20 – 44.

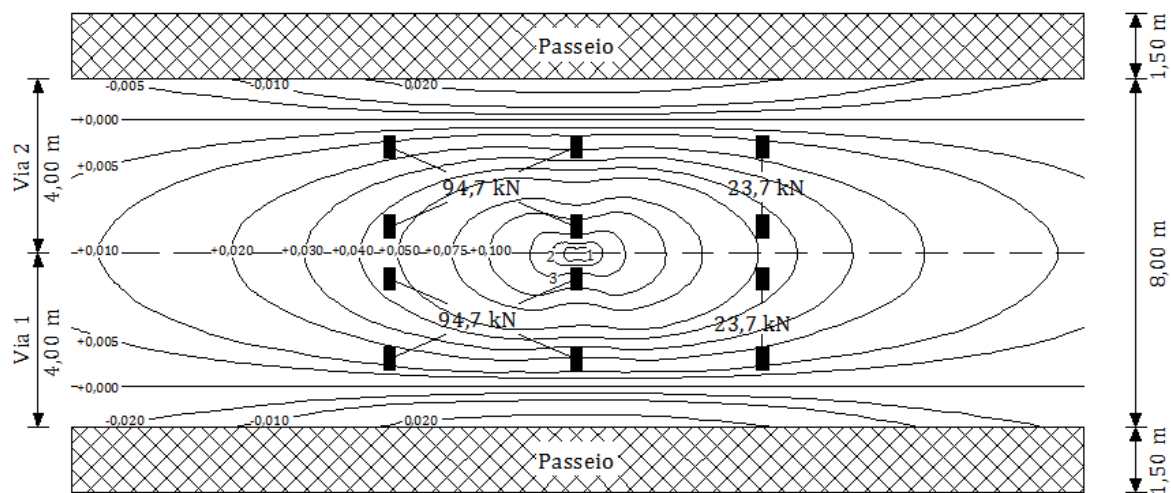


- Sobrecarga uniforme.



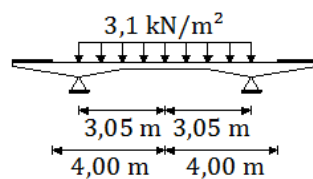
- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas

- Secção de meio vão;
- Veículo HS20 – 44.

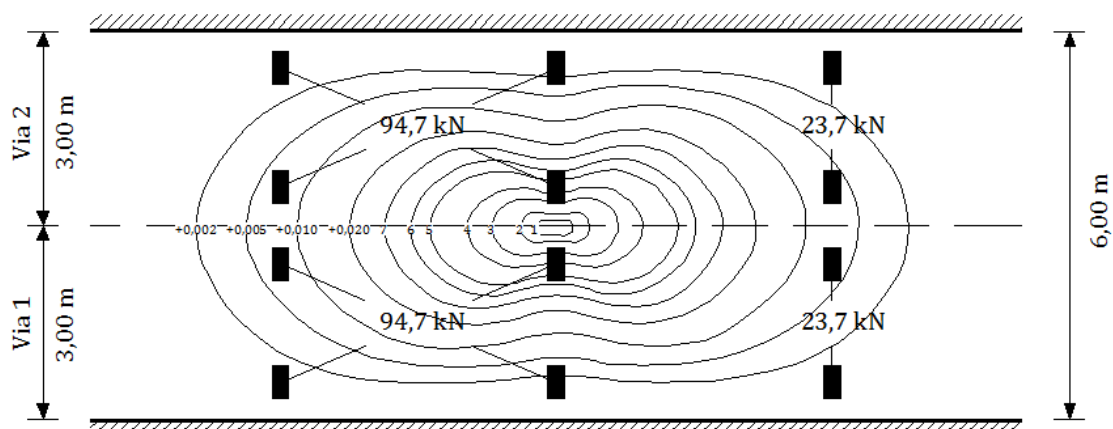


Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150.

- Sobrecarga uniforme.

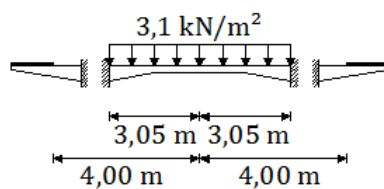


- Secção de apoio;
- Veículo HS20 – 44.



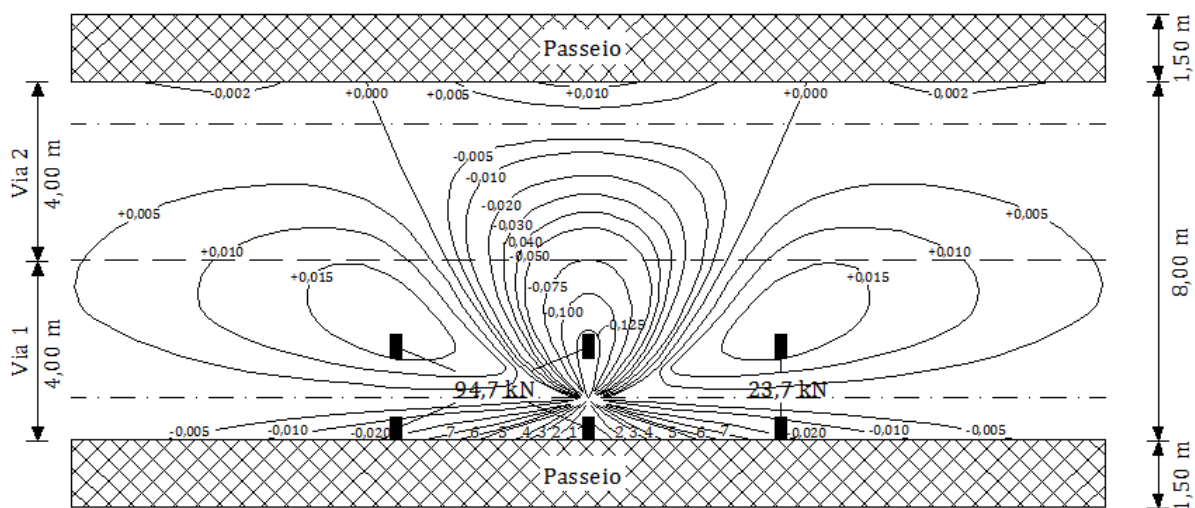
Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: 0,030.

- Sobrecarga uniforme.



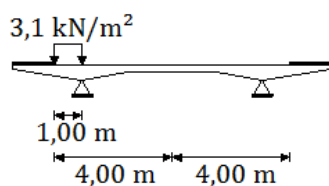
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola

- Secção de meio vão;
- Veículo HS20 – 44.



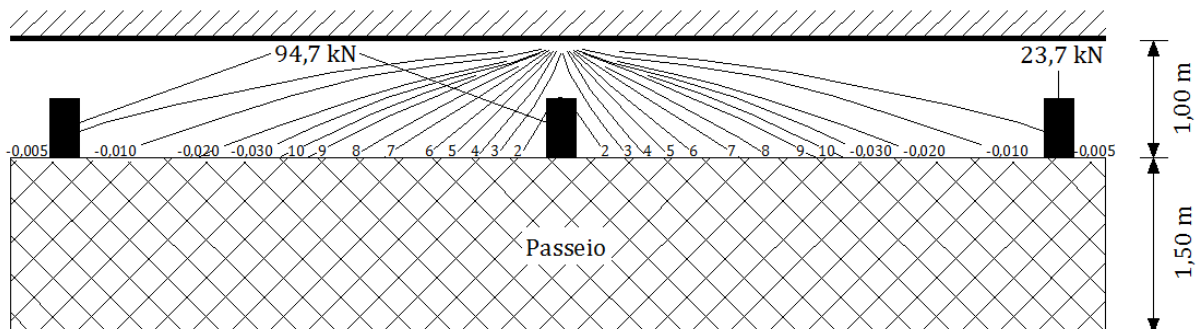
Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Sobrecarga uniforme.



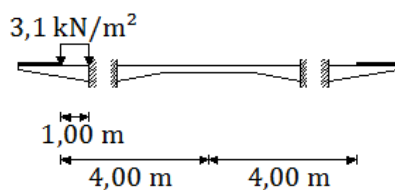
– Secção de apoio;

- Veículo HS20 – 44.



Legenda – 1: +0,400; 2: +0,350; 3: +0,300; 4: +0,250; 5: +0,200; 6: +0,150; 7: +0,100; 8: +0,075; 9: +0,050; 10: +0,040.

- Sobrecarga uniforme.

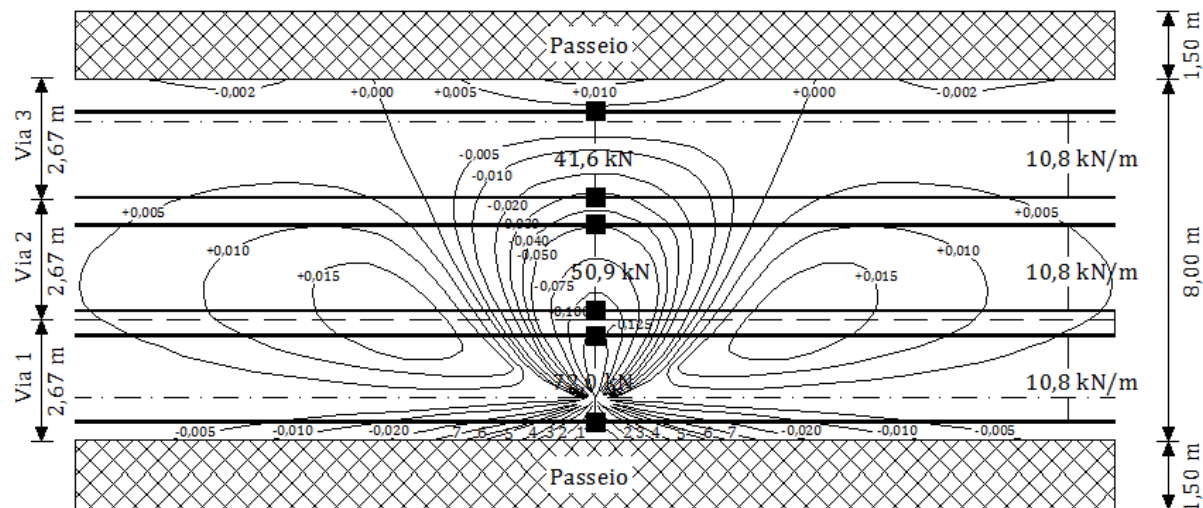


SATCC

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas

– Secção de meio vão;

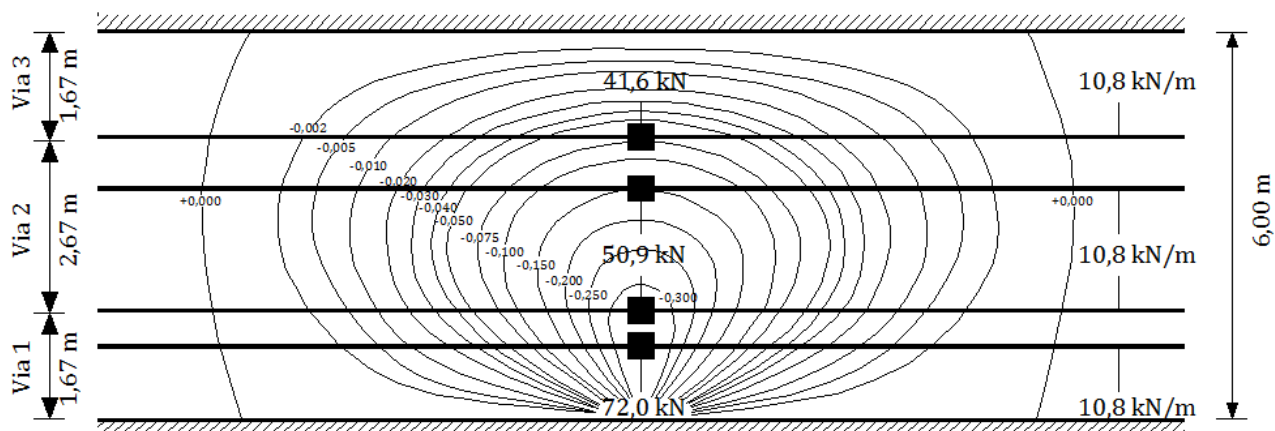
- Modelo de sobrecarga NA – (1) + (2).



Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

– Secção de apoio;

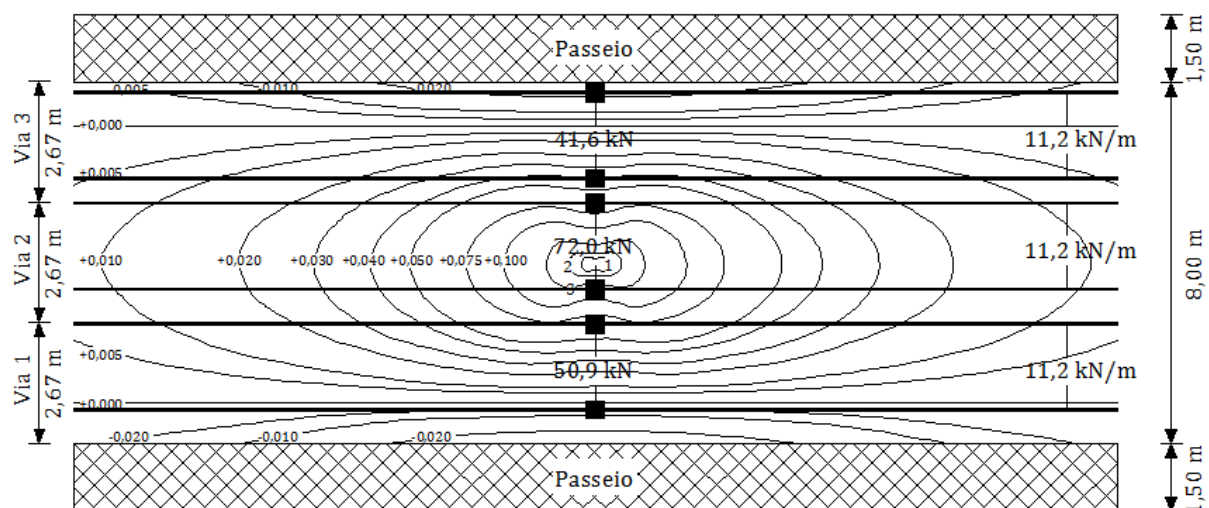
- Modelo de sobrecarga NA – (1) + (2).



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas

– Secção de meio vão;

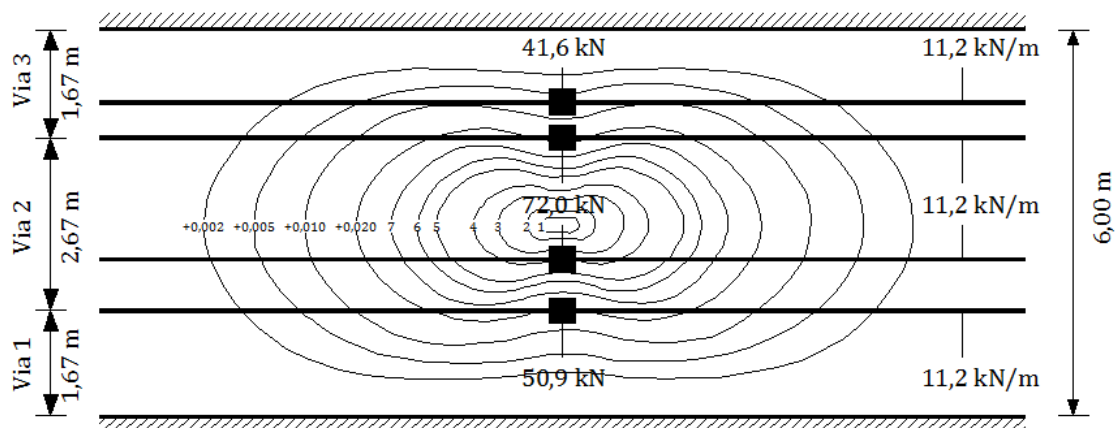
- Modelo de sobrecarga NA – (1) + (2).



Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150.

– Secção de apoio;

- Modelo de sobrecarga NA – (1) + (2).

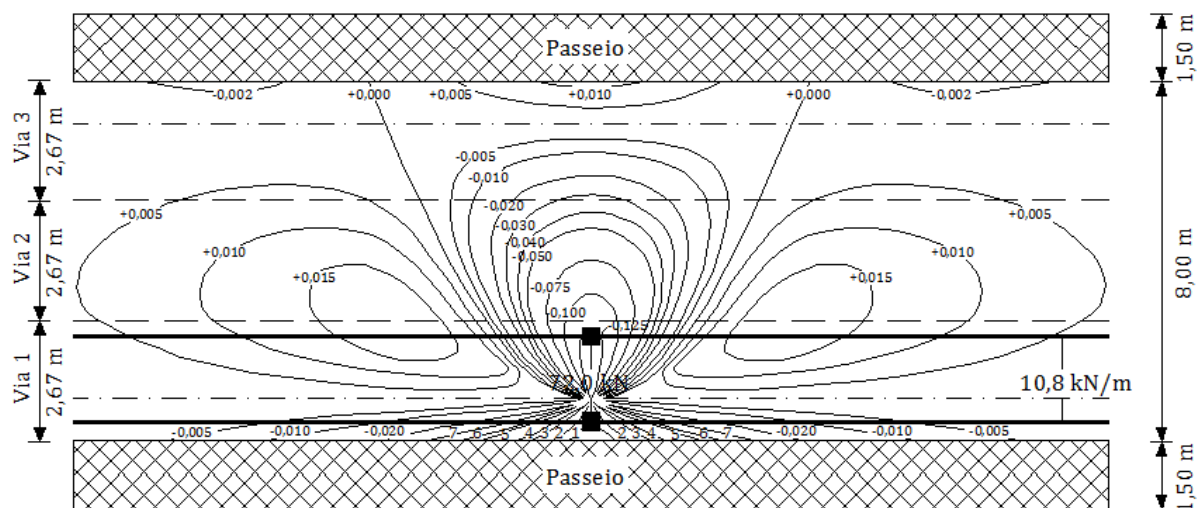


Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: 0,030.

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola

– Secção de meio vão;

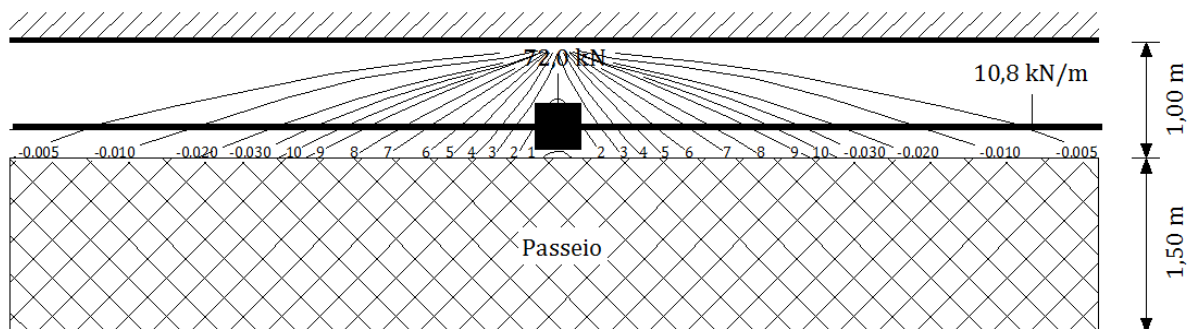
- Modelo de sobrecarga NA – (1) + (2).



Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

– Secção de apoio;

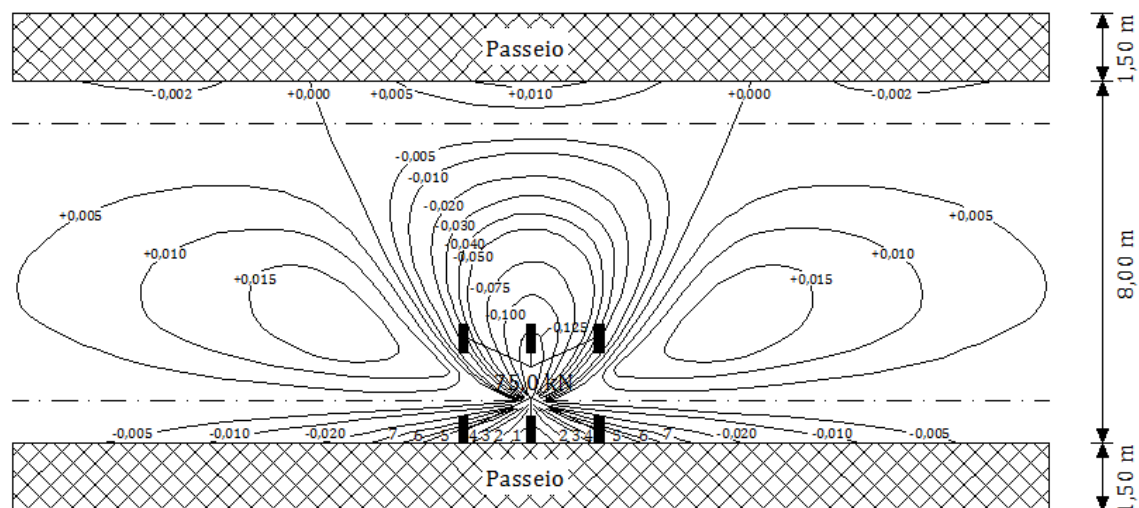
- Modelo de sobrecarga NA – (1) + (2).



Legenda – 1: +0,400; 2: +0,350; 3: +0,300; 4: +0,250; 5: +0,200; 6: +0,150; 7: +0,100; 8: +0,075; 9: +0,050; 10: +0,040.

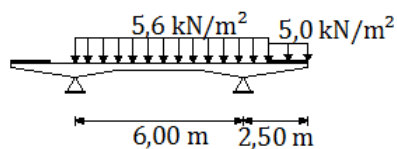
ABNT

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.

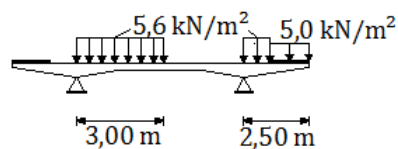


Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Sobrecarga uniforme.

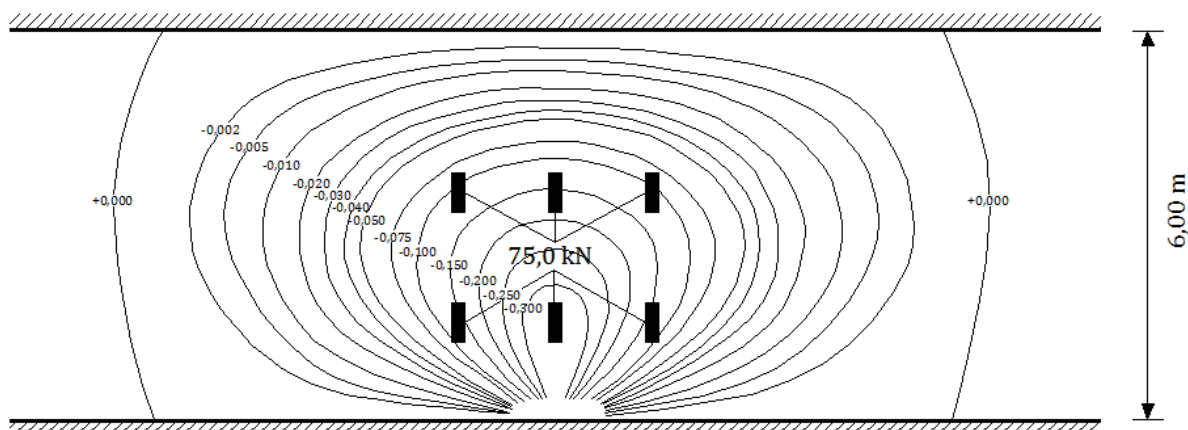


Secção sem veículo

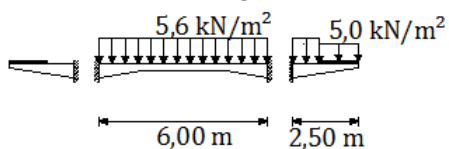


Secção com veículo

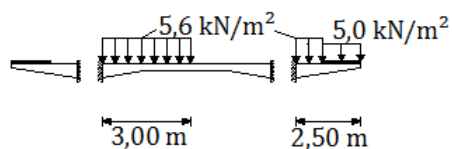
- Secção de apoio;
 - Veículo tipo.



- Sobrecarga uniforme.



Secção sem veículo

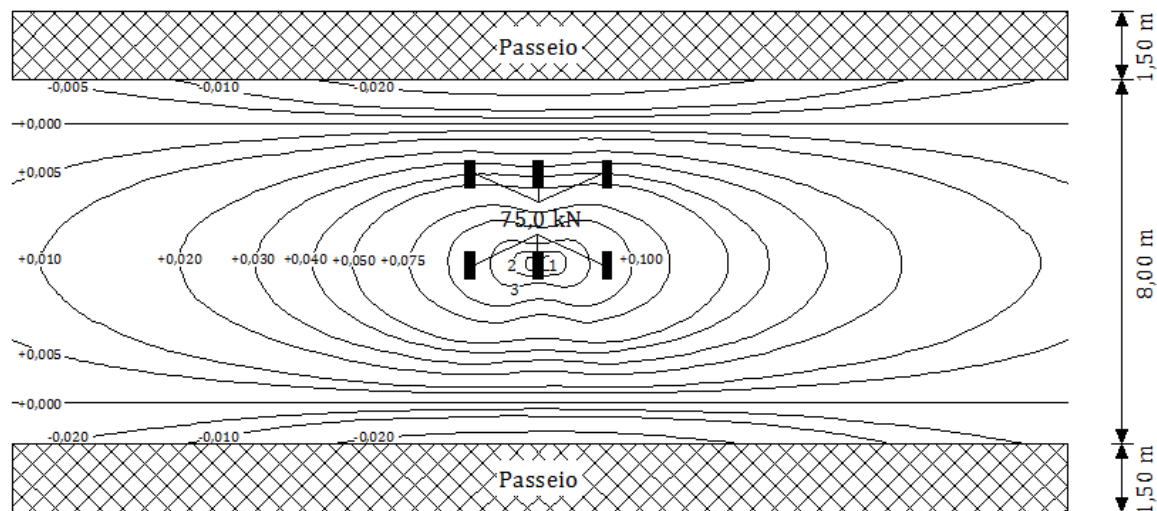


Secção com veículo

- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas

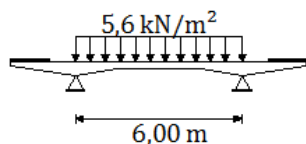
– Secção de meio vão;

- Veículo tipo.

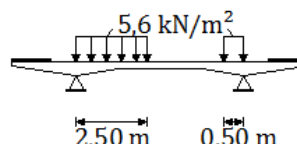


Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150.

- Sobrecarga uniforme.



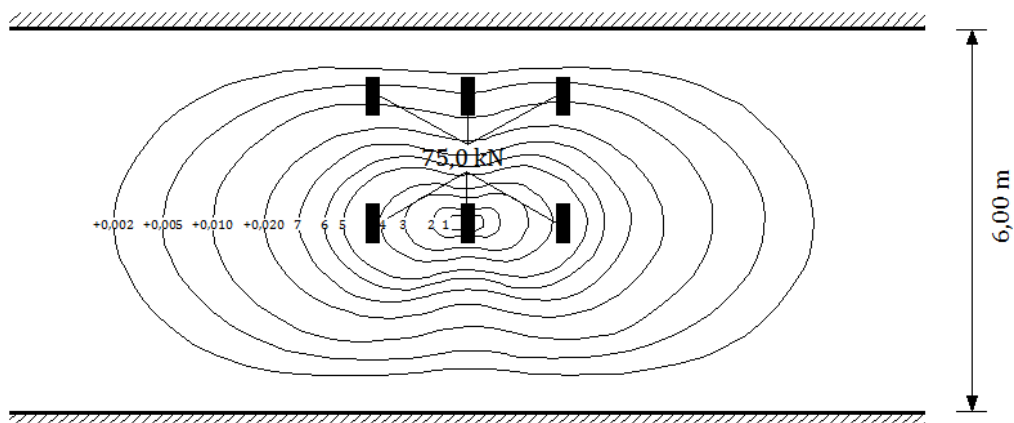
Secção sem veículo



Secção com veículo

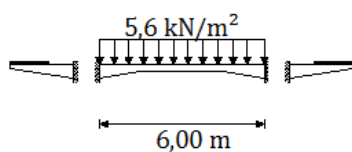
– Secção de apoio;

- Veículo tipo.

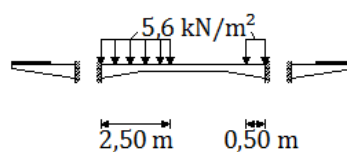


Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: 0,030.

- Sobrecarga uniforme.



Secção sem veículo

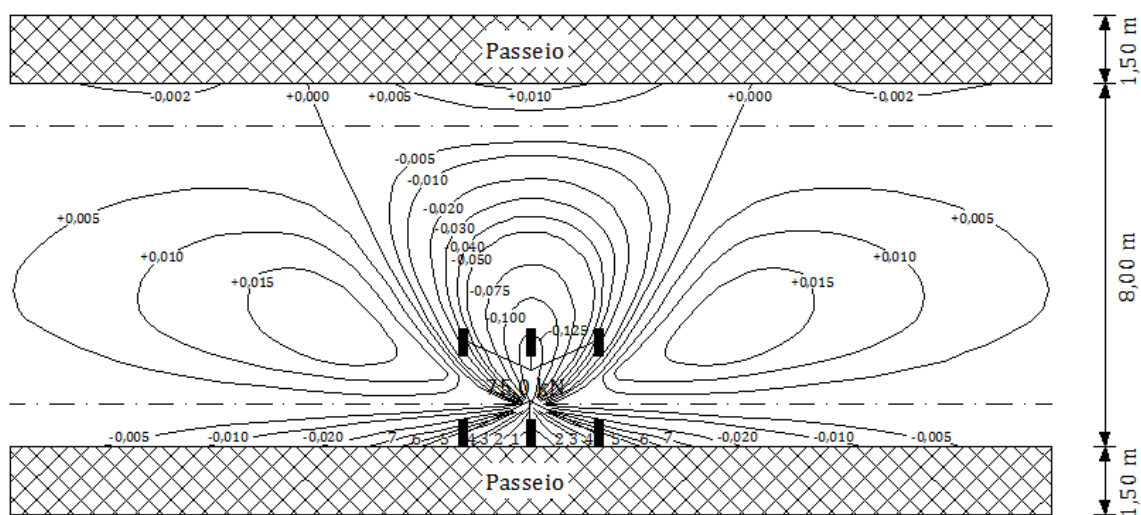


Secção com veículo

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola

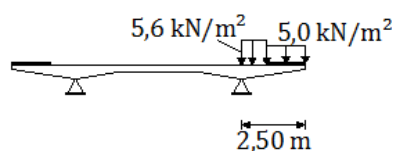
– Secção de meio vão;

- Veículo tipo.

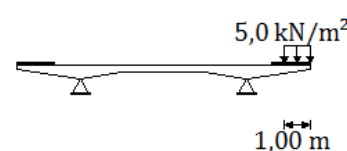


Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Sobrecarga uniforme.



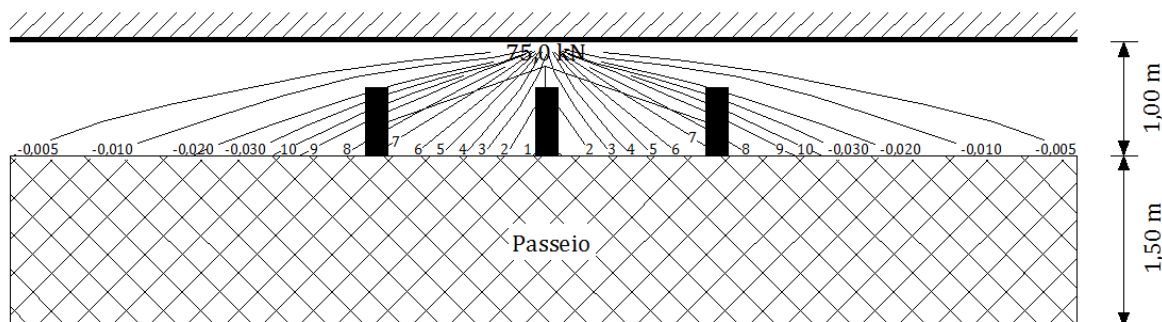
Secção sem veículo



Secção com veículo

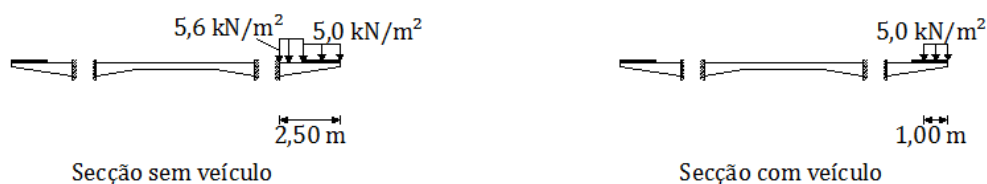
– Secção de apoio;

- Veículo tipo.



Legenda – 1: +0,400; 2: +0,350; 3: +0,300; 4: +0,250; 5: +0,200; 6: +0,150; 7: +0,100; 8: +0,075; 9: +0,050; 10: +0,040.

- Sobrecarga uniforme.



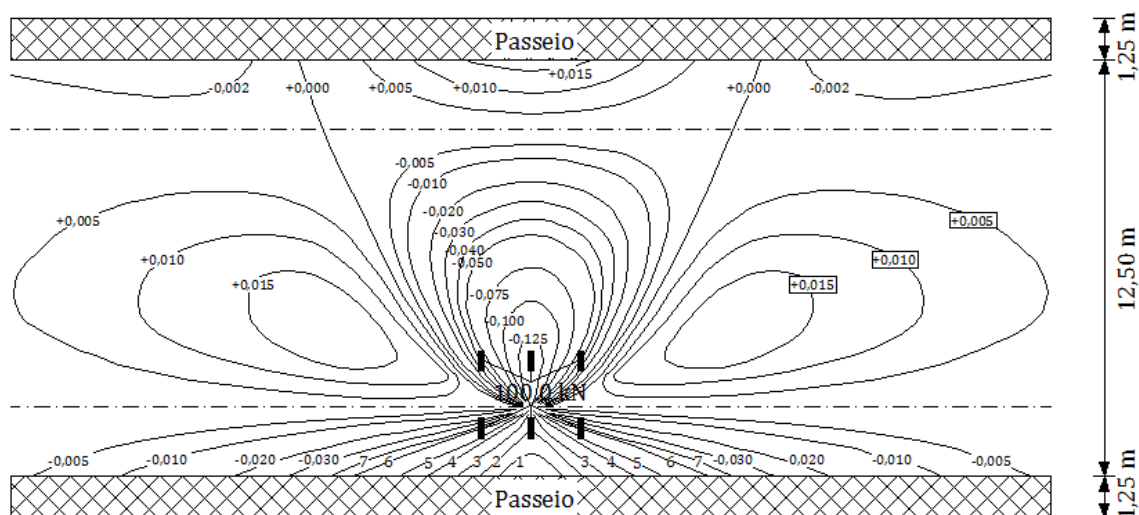
A2.2 – Caso de estudo 2

- Variante com 25,00 m de vão corrente

Nesta variante o coeficiente de encastramento parcial α toma o valor de 0,601. Este coeficiente só é tido em conta nos resultados dos modelos de barra obtidos pelo programa Ftool®, para a secção de meio vão. Na secção de apoio toma-se os valores obtidos do modelo perfeitamente encastrado.

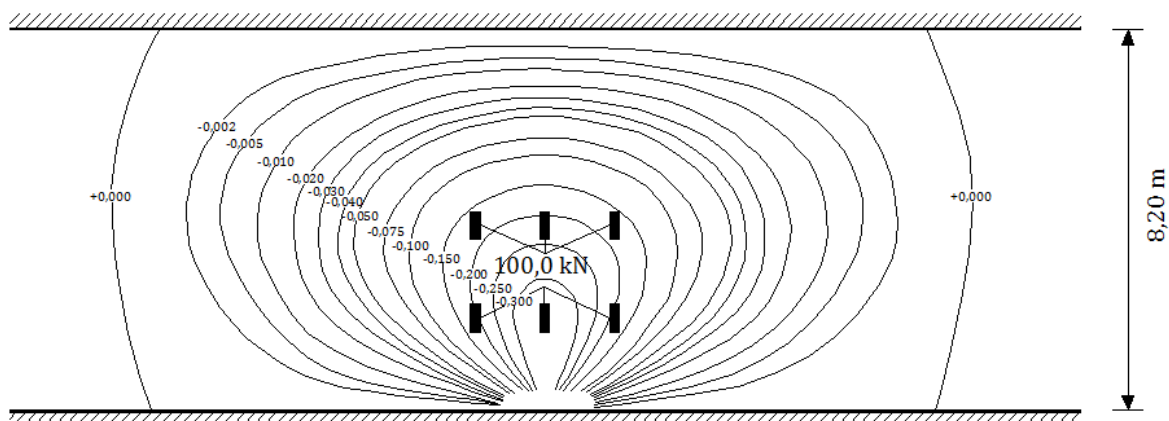
RSA

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.

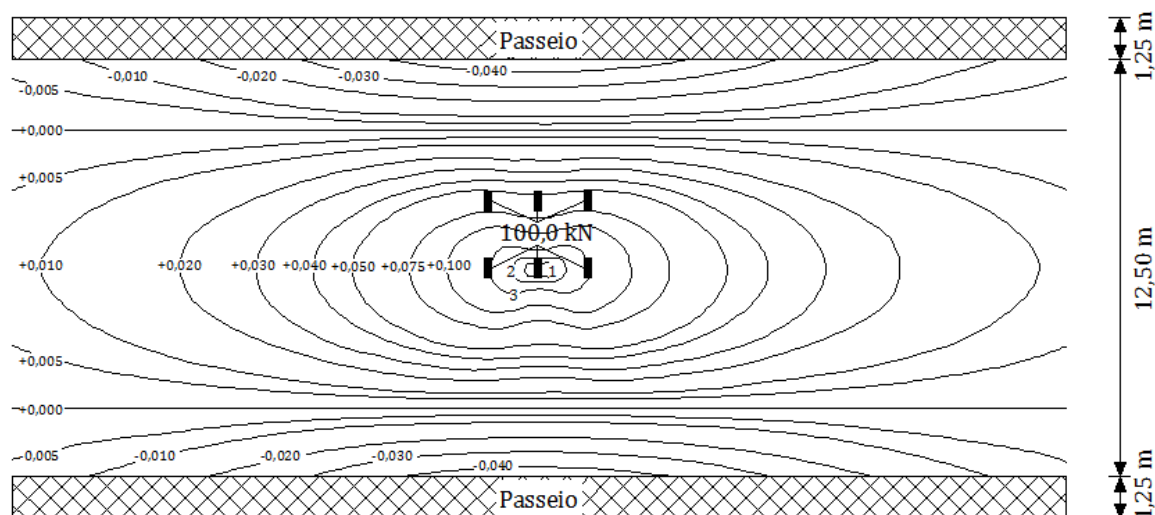


Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Secção de apoio;
- Veículo tipo.

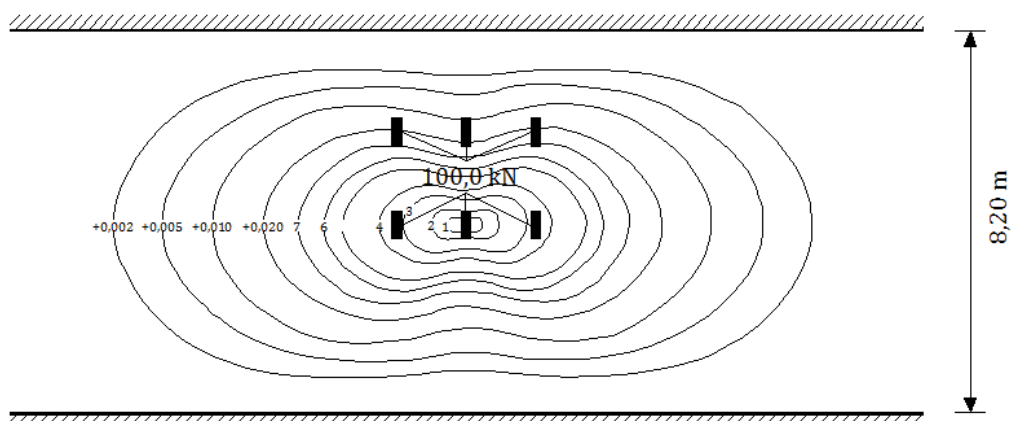


- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.



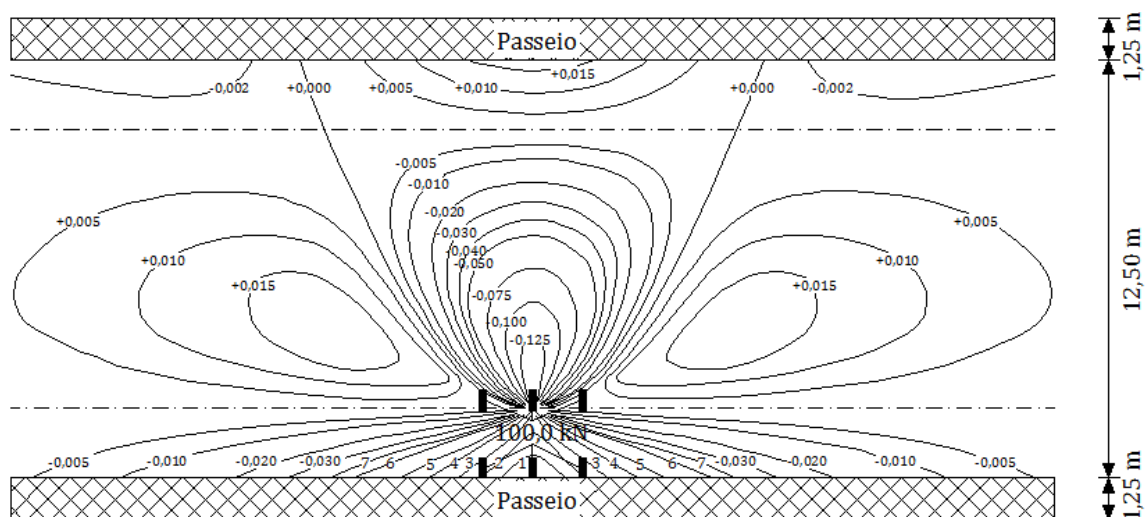
Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150.

- Secção de apoio;
- Veículo tipo.



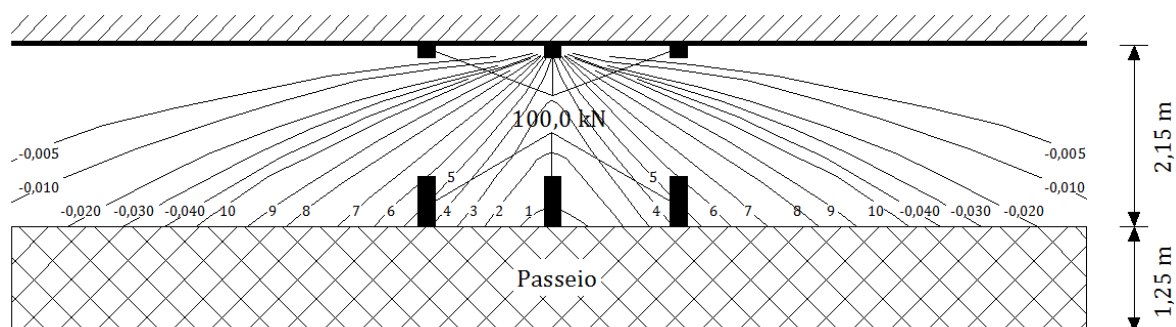
Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: 0,030.

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.



Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

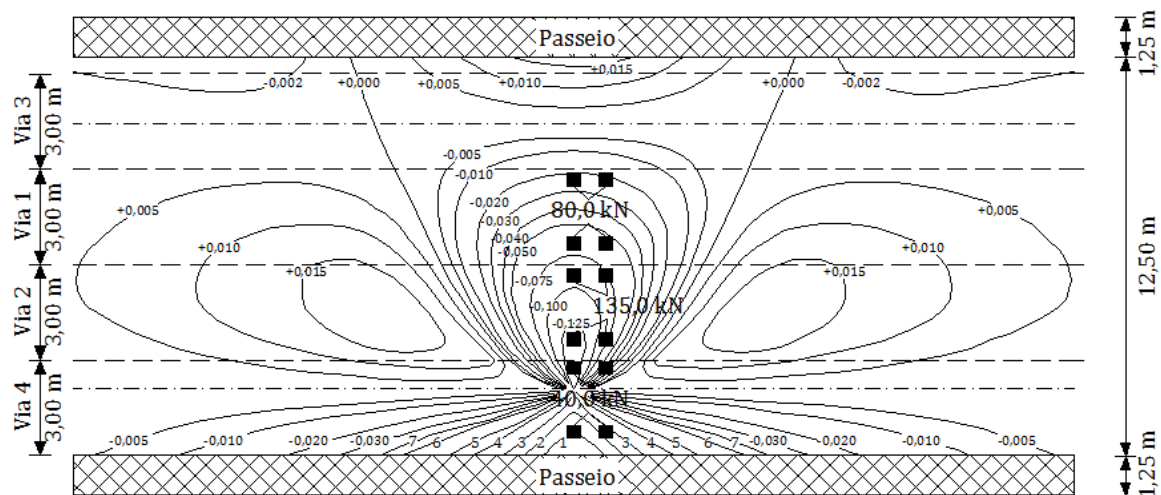
- Secção de apoio;
- Veículo tipo.



Legenda – 1: +0,400; 2: +0,350; 3: +0,300; 4: +0,250; 5: +0,200; 6: +0,150; 7: +0,100; 8: +0,075; 9: +0,050; 10: +0,040.

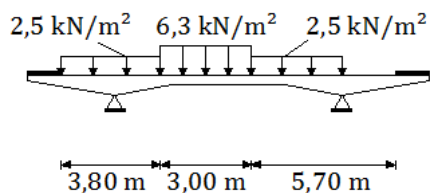
EC1

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS



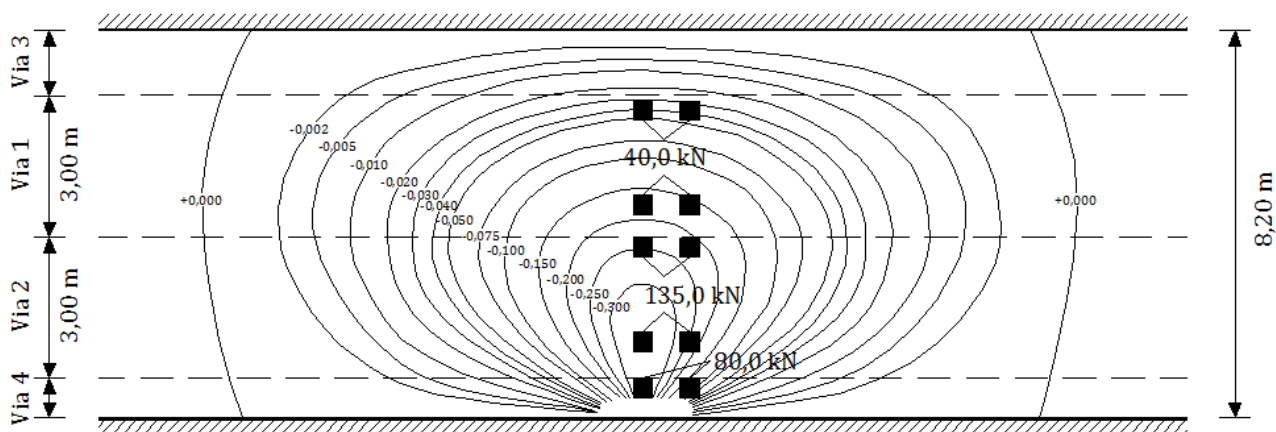
Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL

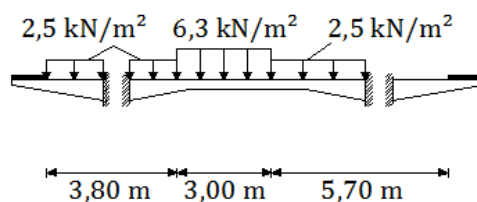


– Secção de apoio;

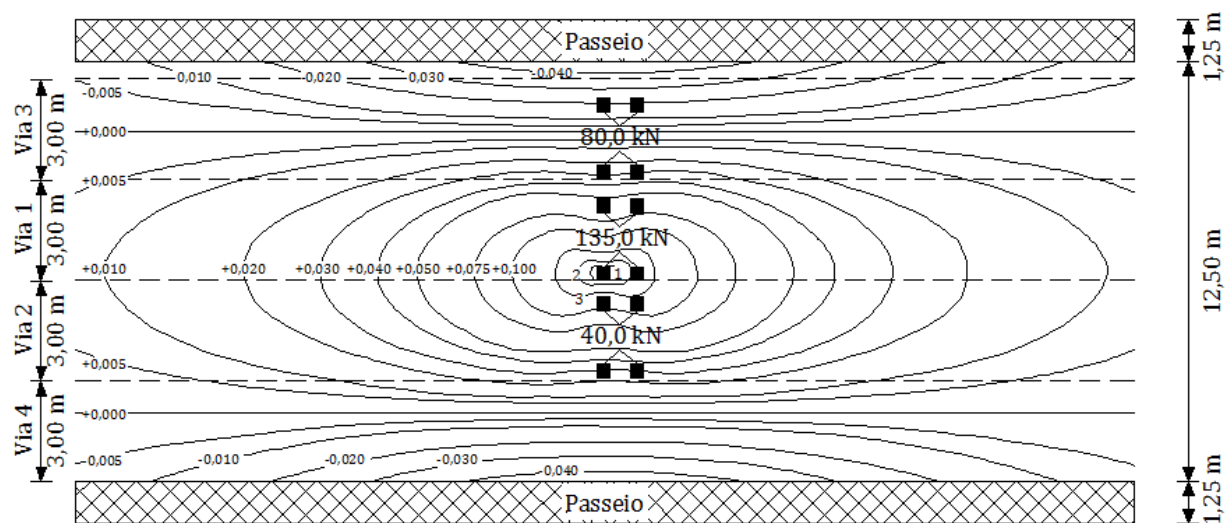
- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS



- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL

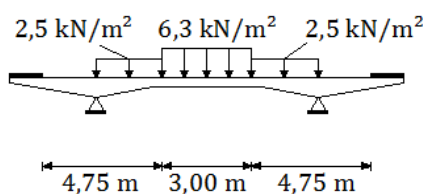


- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS.



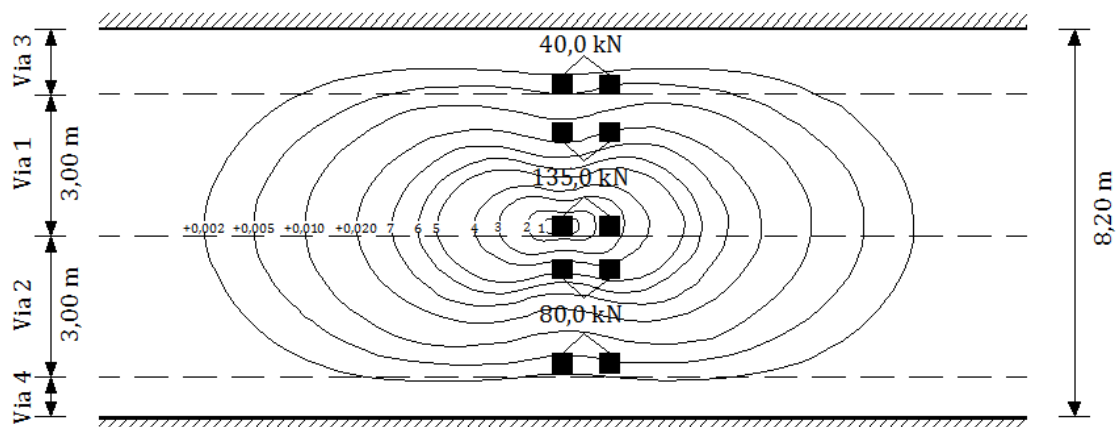
Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150.

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL



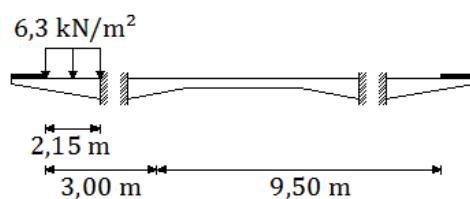
- Secção de apoio;

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS.



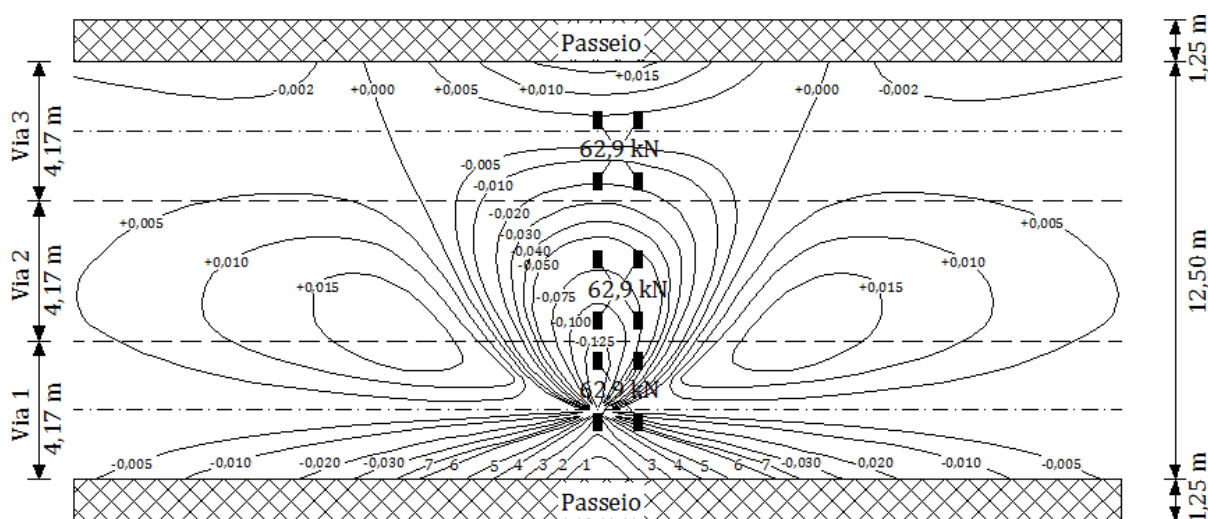
Legenda – 1: +0,400; 2: +0,350; 3: +0,300; 4: +0,250; 5: +0,200; 6: +0,150; 7: +0,100; 8: +0,075; 9: +0,050; 10: +0,040.

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL



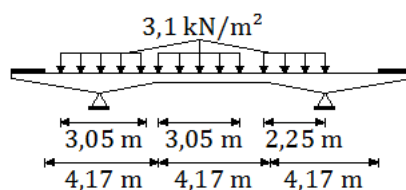
AASHTO

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
– Secção de meio vão;
 - Veículo H20 – 44.

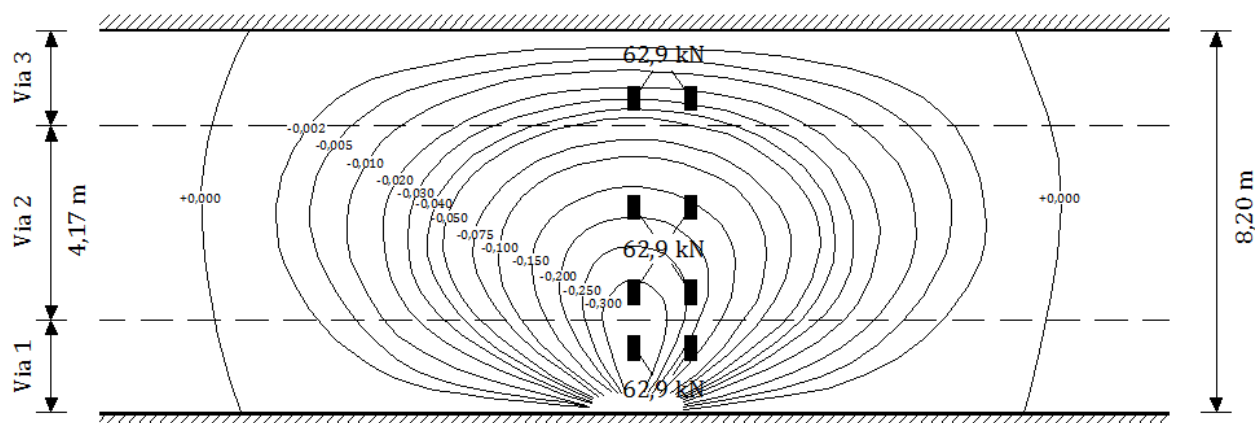


Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

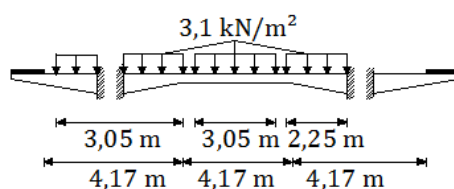
- Sobrecarga uniforme.



- Secção de apoio;
- Veículo H20 – 44.

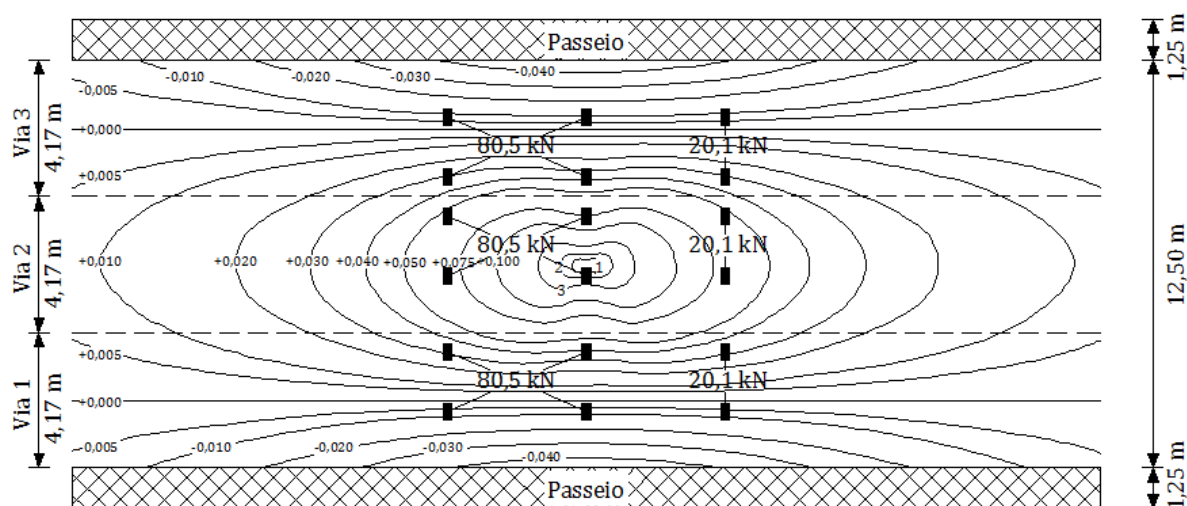


- Sobrecarga uniforme.



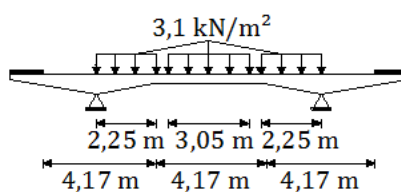
- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas

- Secção de meio vão;
- Veículo HS20 – 44.

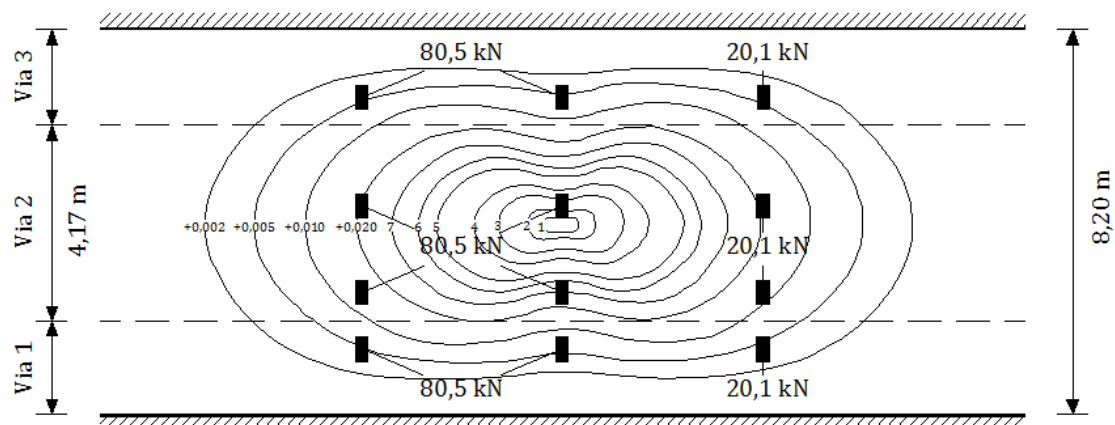


Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150.

- Sobrecarga uniforme.

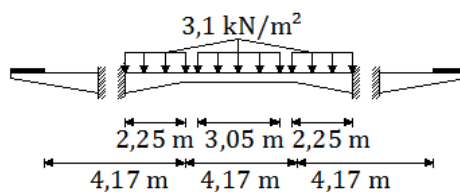


- Secção de apoio;
- Veículo HS20 – 44.



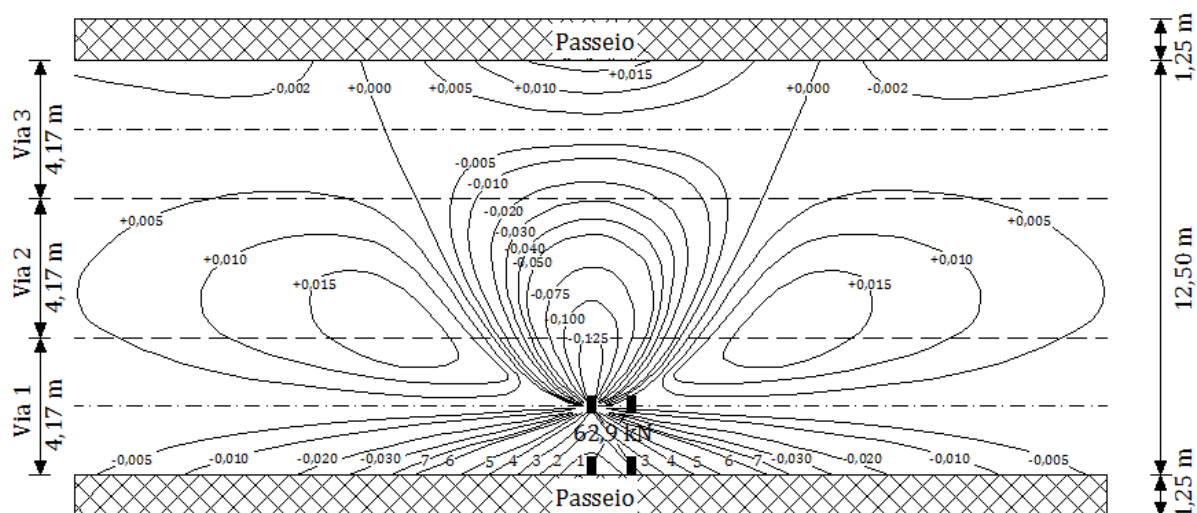
Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: 0,030.

- Sobrecarga uniforme.



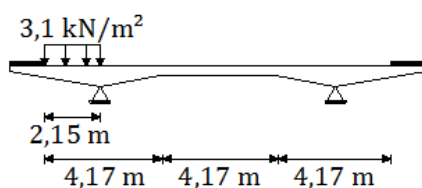
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola

- Secção de meio vão;
- Veículo H20 – 44.



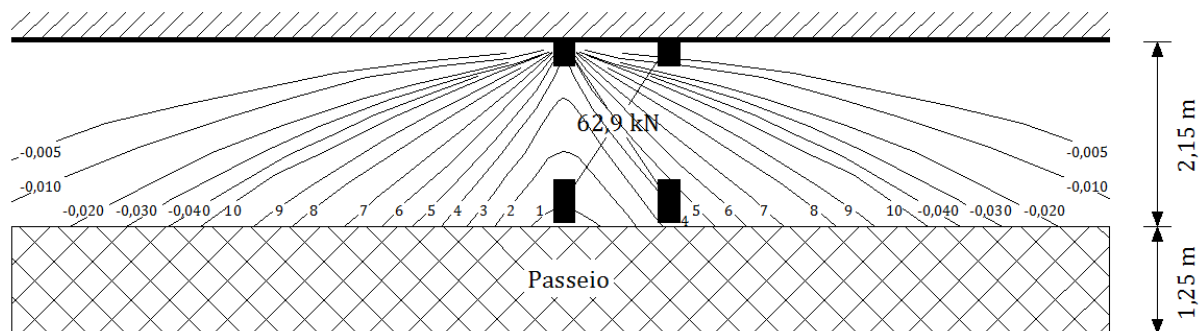
Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Sobrecarga uniforme.



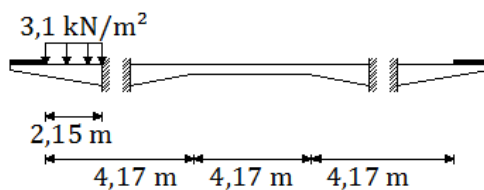
– Secção de apoio;

- Veículo H20 – 44.



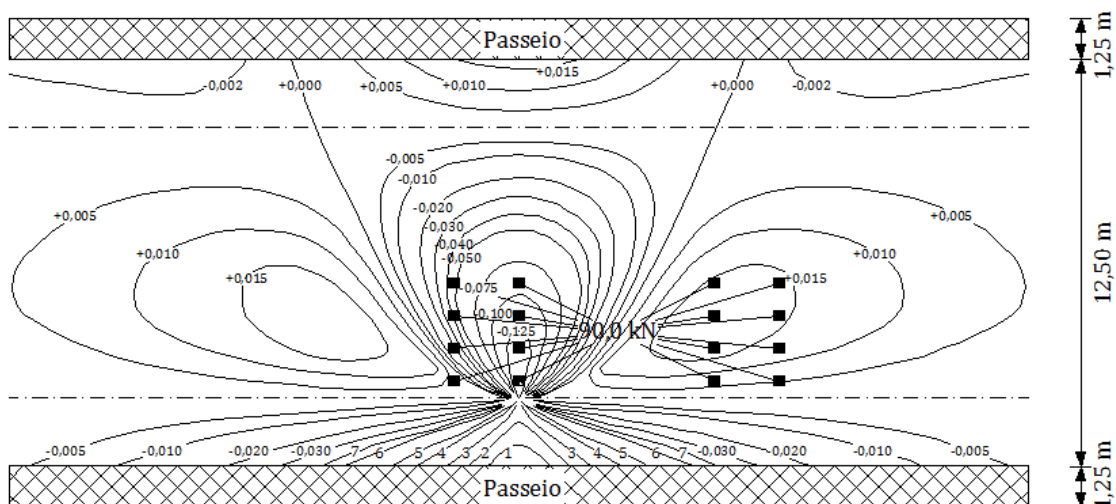
Legenda – 1: +0,400; 2: +0,350; 3: +0,300; 4: +0,250; 5: +0,200; 6: +0,150; 7: +0,100; 8: +0,075; 9: +0,050; 10: +0,040.

- Sobrecarga uniforme.



SATCC

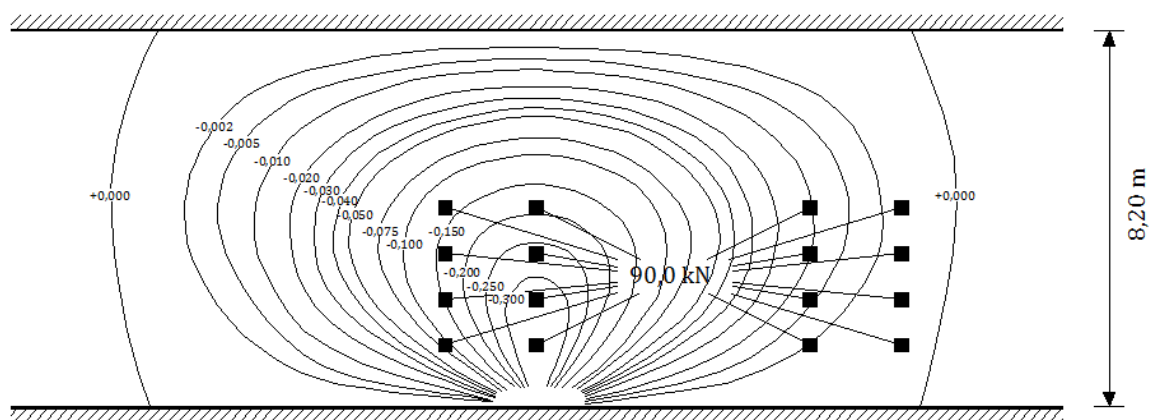
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga NB.



Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

– Secção de apoio;

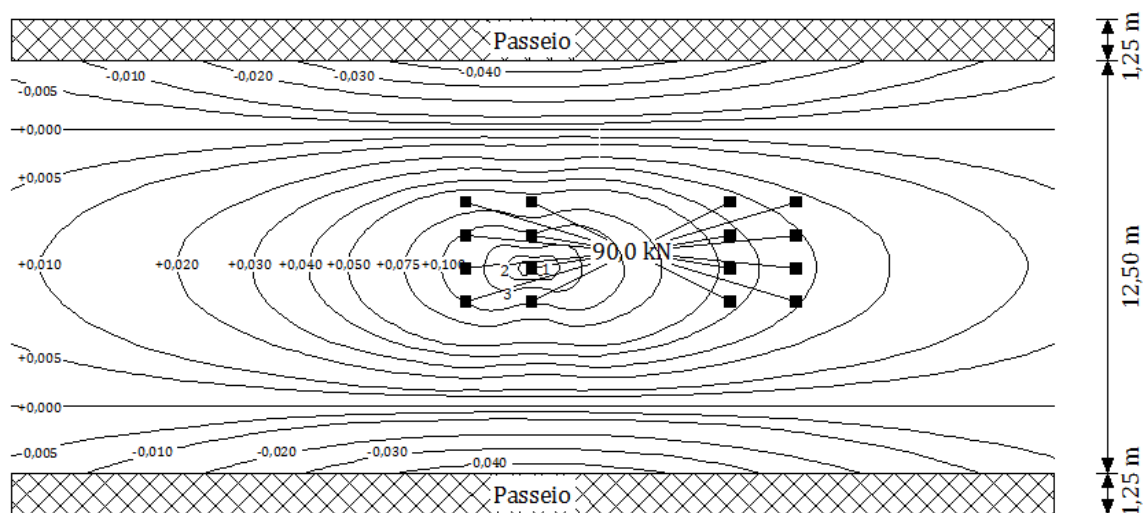
- Modelo de sobrecarga NB.



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas

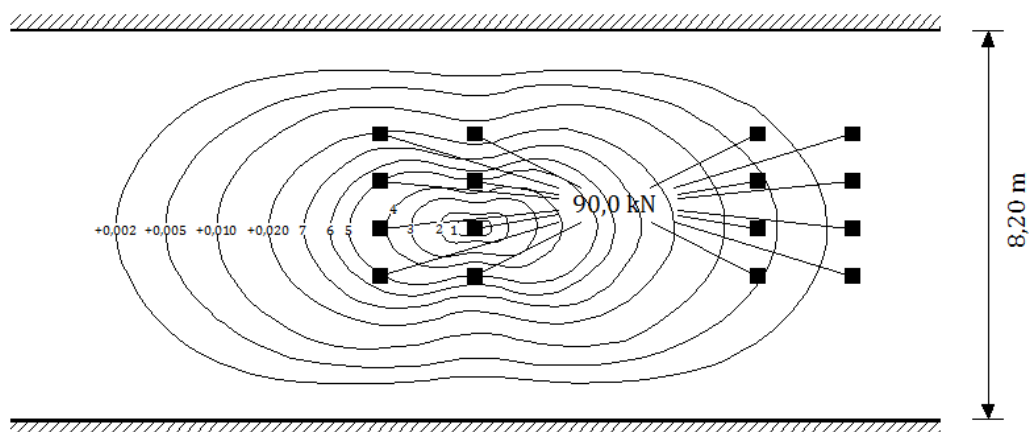
– Secção de meio vão;

- Modelo de sobrecarga NB.



Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150.

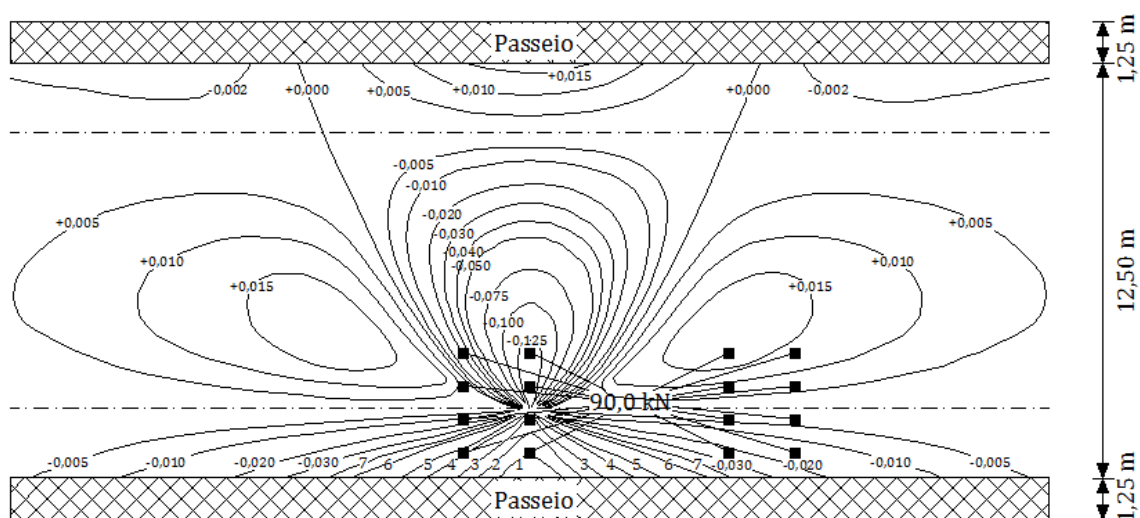
- Secção de apoio;
- Modelo de sobrecarga NB.



Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: 0,030.

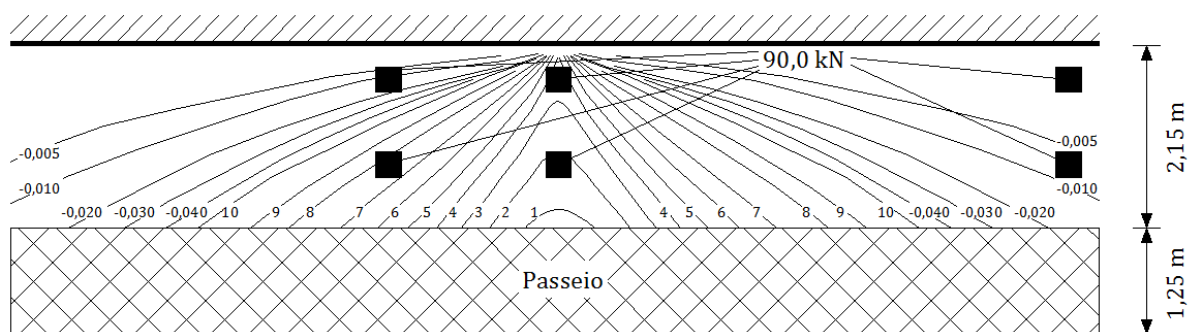
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola

- Secção de meio vão;
- Modelo de sobrecarga NB.



Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

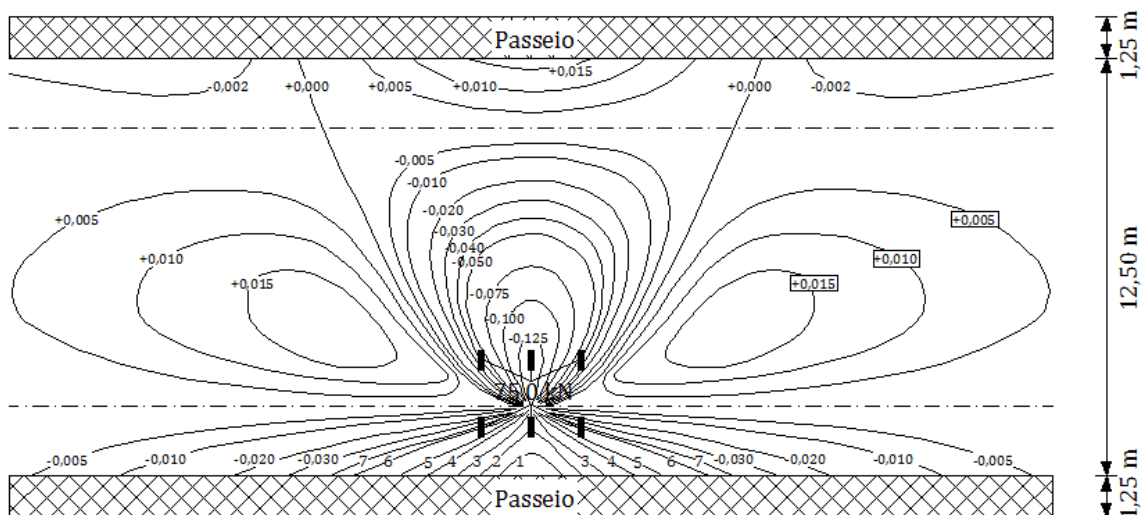
- Secção de apoio;
- Modelo de sobrecarga NB.



Legenda – 1: +0,400; 2: +0,350; 3: +0,300; 4: +0,250; 5: +0,200; 6: +0,150; 7: +0,100; 8: +0,075; 9: +0,050; 10: +0,040.

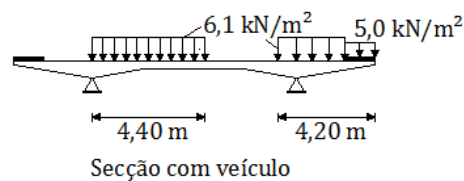
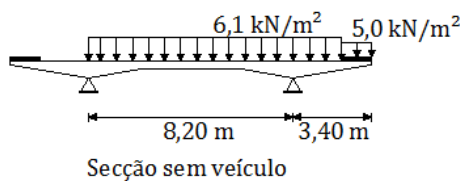
ABNT

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.

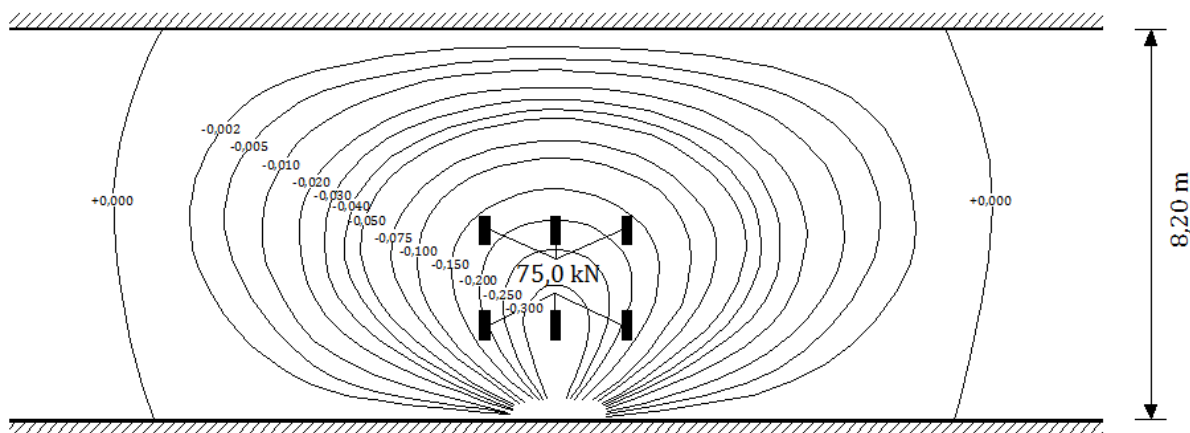


Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

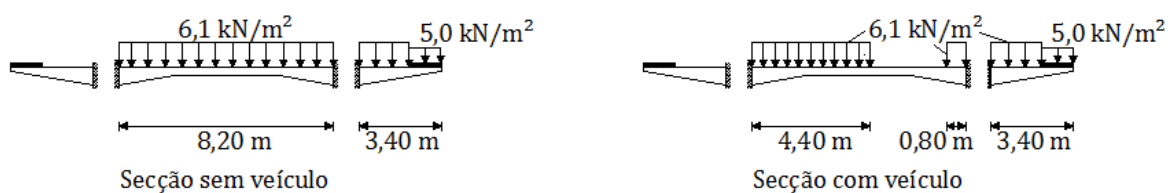
- Sobrecarga uniforme.



- Secção de apoio;
 - Veículo tipo.



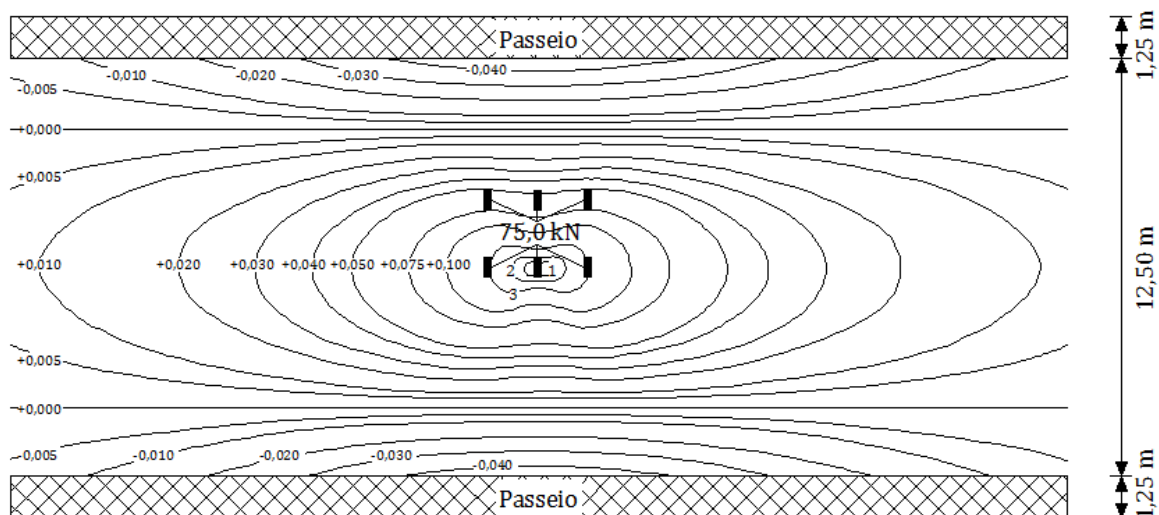
- Sobrecarga uniforme.



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas

– Secção de meio vão;

- Veículo tipo.



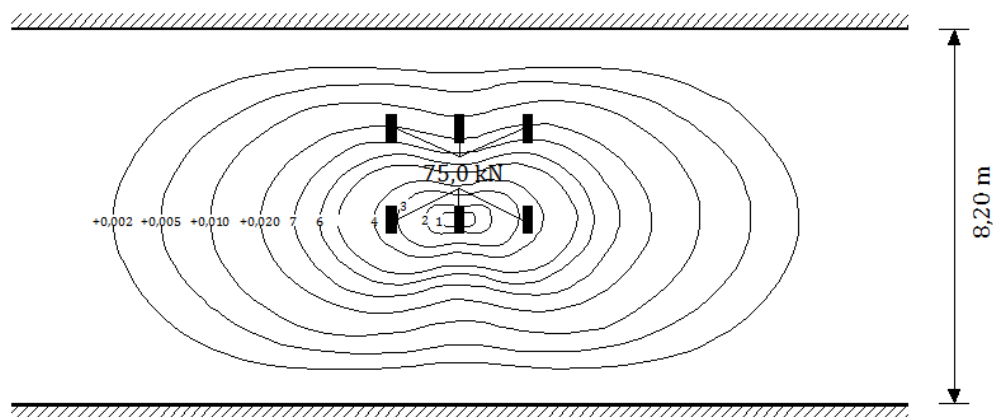
Legenda – 1: $+0,250$; 2: $+0,200$; 3: $+0,150$.

- Sobrecarga uniforme.



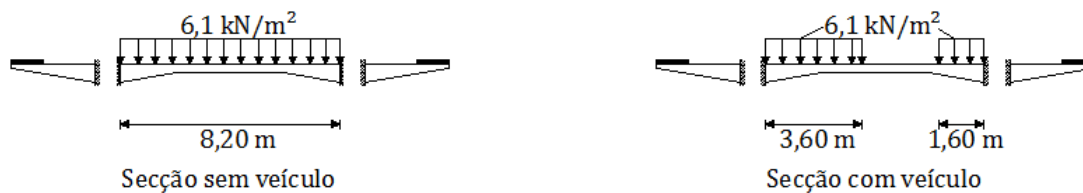
– Secção de apoio;

- Veículo tipo.



Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: 0,030.

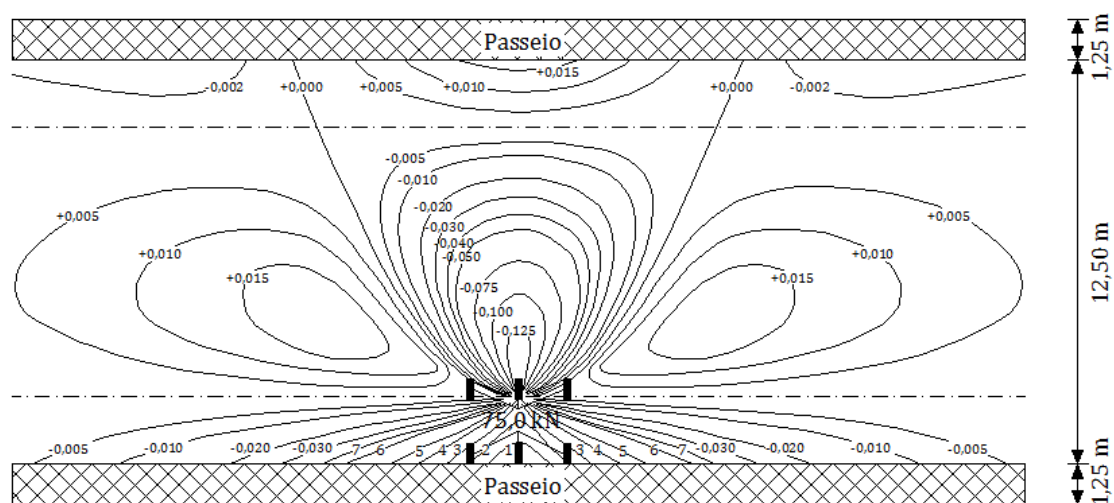
- Sobrecarga uniforme.



- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola

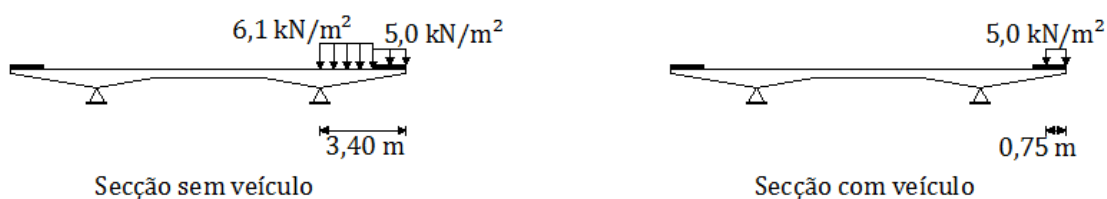
– Secção de meio vão;

- Veículo tipo.



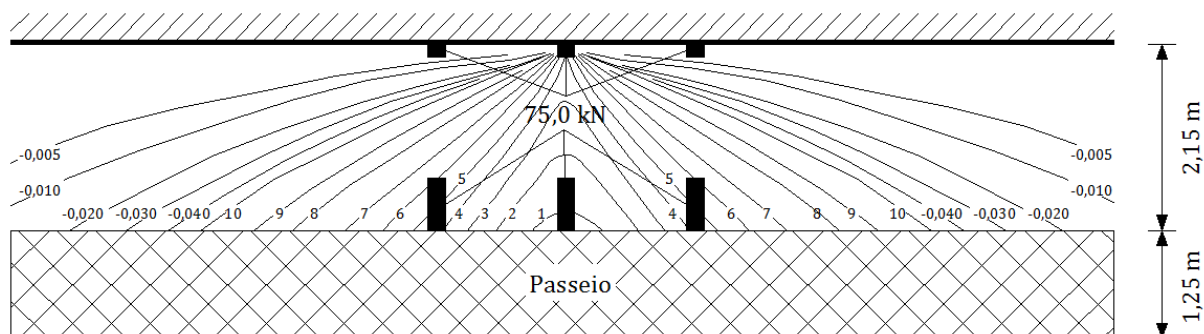
Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Sobrecarga uniforme.



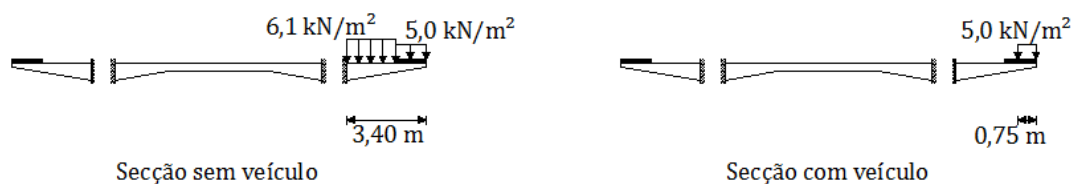
– Secção de apoio;

- Veículo tipo.



Legenda – 1: +0,400; 2: +0,350; 3: +0,300; 4: +0,250; 5: +0,200; 6: +0,150; 7: +0,100; 8: +0,075; 9: +0,050; 10: +0,040.

- Sobrecarga uniforme.

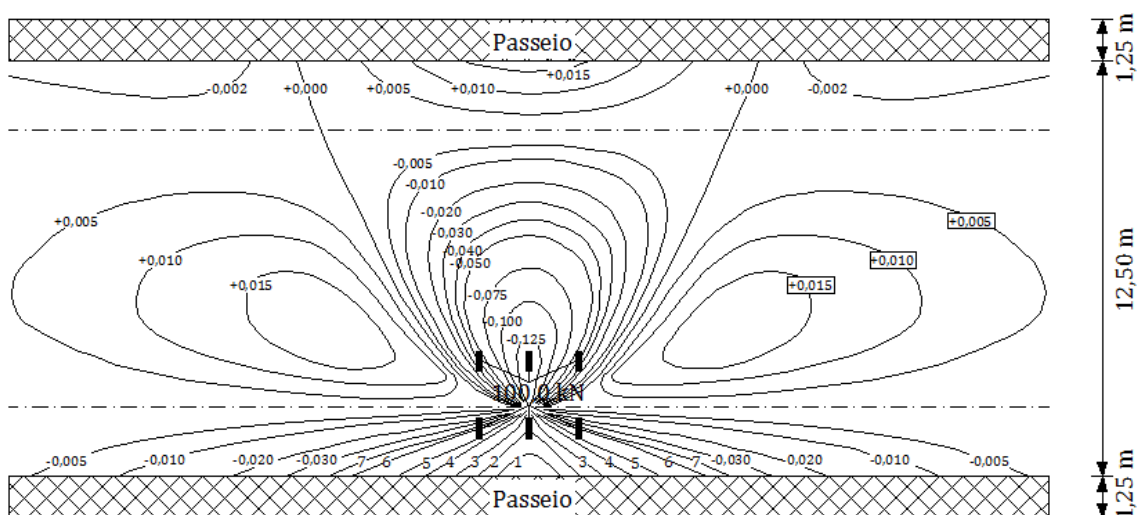


- Variante com 40,00 m de vão corrente

Nesta variante o coeficiente de encastramento parcial α toma o valor de 0,411. Este coeficiente só é tido em conta nos resultados dos modelos de barra obtidos pelo programa Ftool®, para a secção de meio vão. Na secção de apoio toma-se os valores obtidos do modelo perfeitamente encastrado.

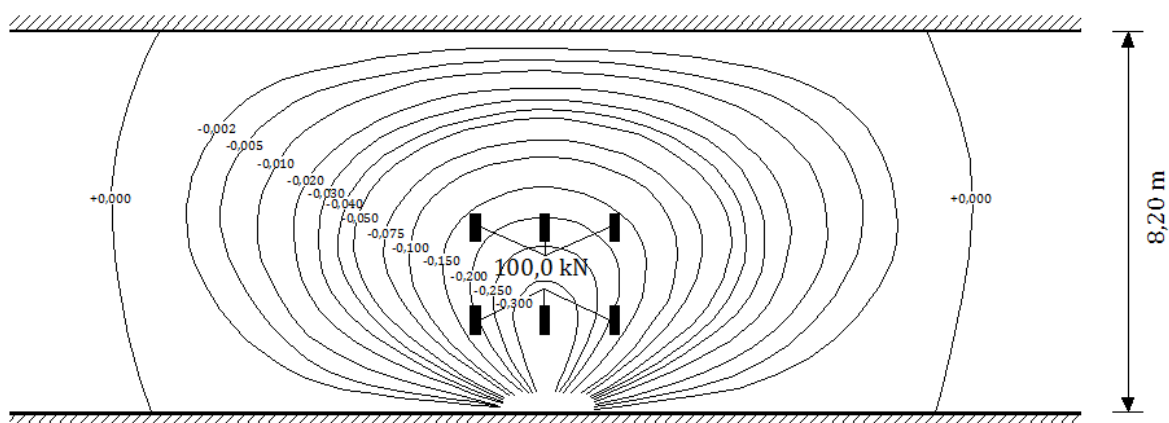
RSA

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.

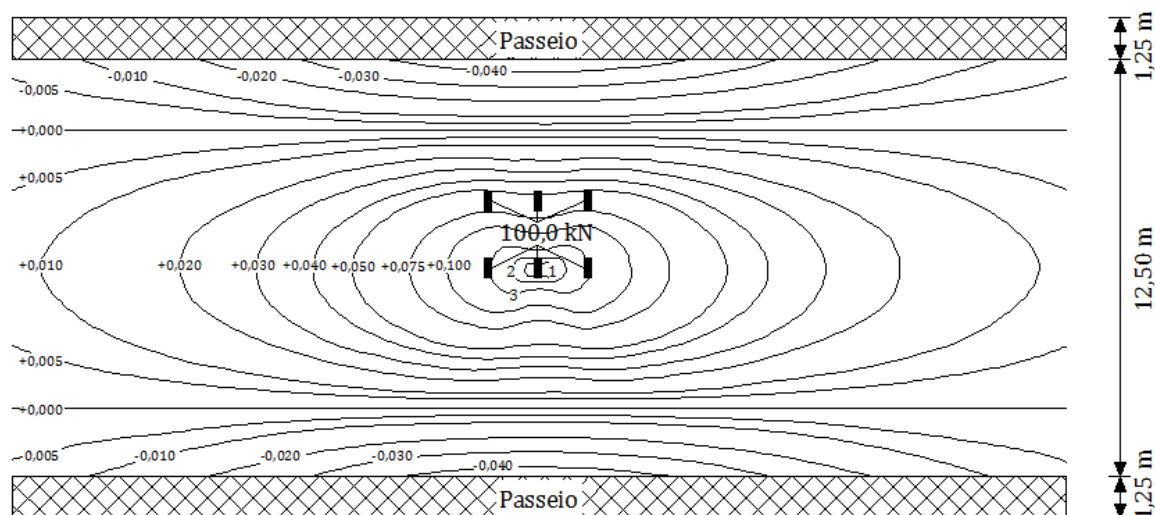


Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Secção de apoio;
- Veículo tipo.

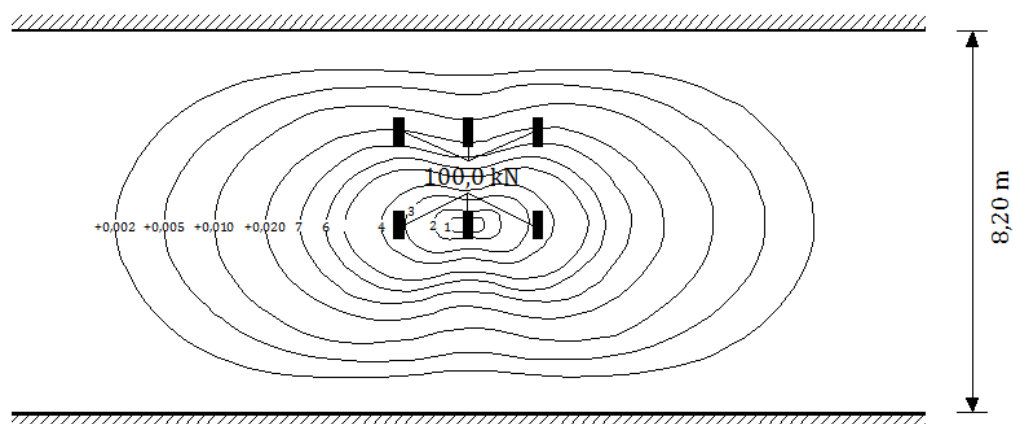


- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
- Secção de meio vão;
- Veículo tipo.



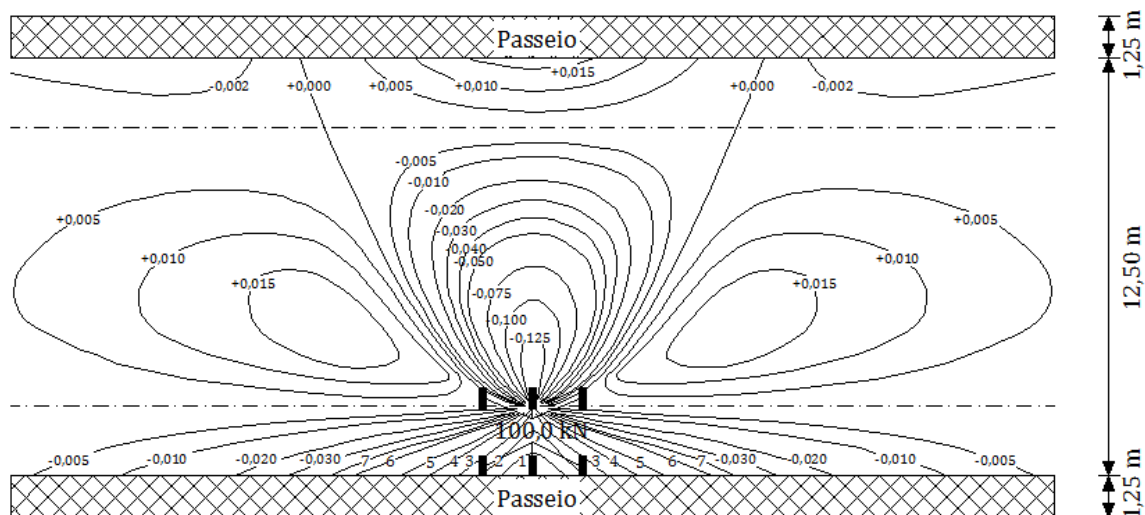
Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150.

- Secção de apoio;
- Veículo tipo.



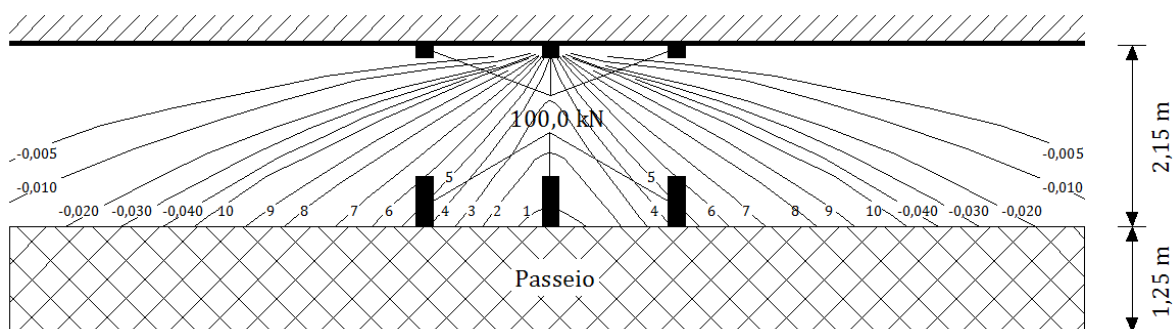
Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: 0,030.

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.



Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

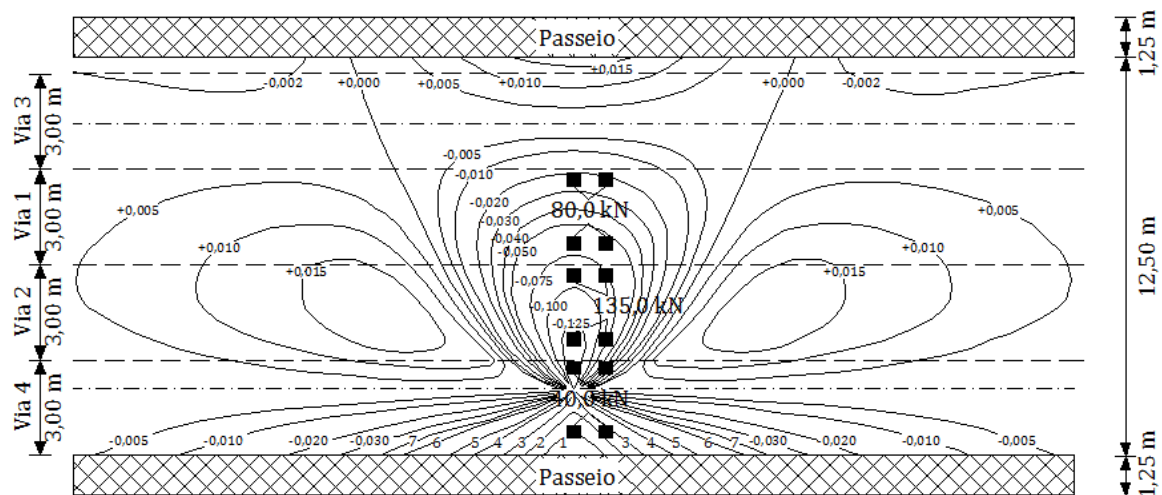
- Secção de apoio;
- Veículo tipo.



Legenda – 1: +0,400; 2: +0,350; 3: +0,300; 4: +0,250; 5: +0,200; 6: +0,150; 7: +0,100; 8: +0,075; 9: +0,050; 10: +0,040.

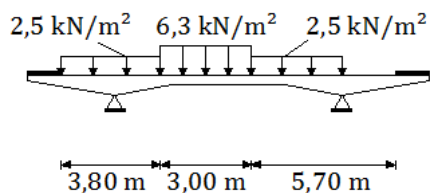
EC1

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS



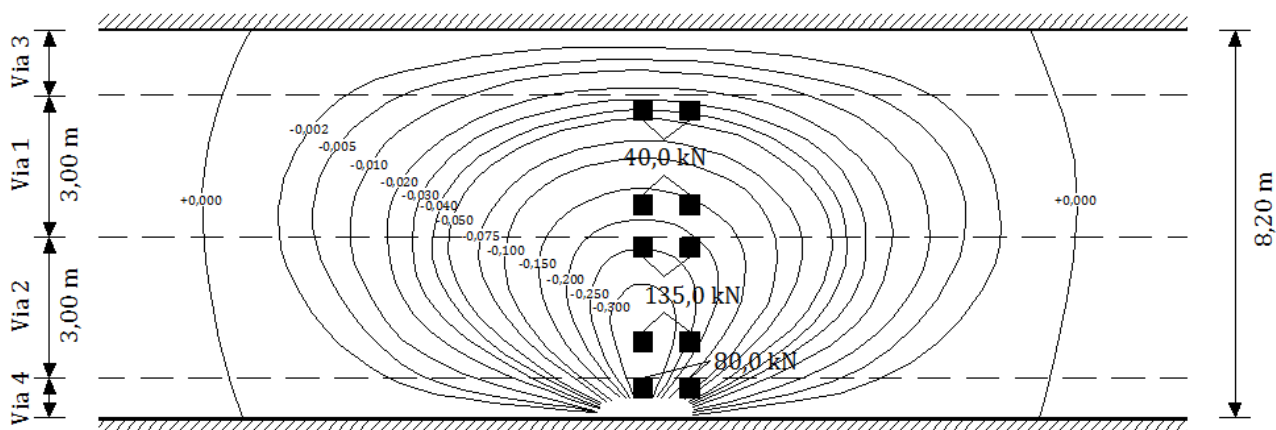
Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL

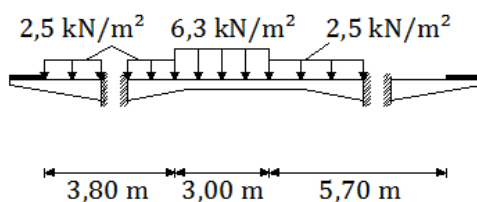


– Secção de apoio;

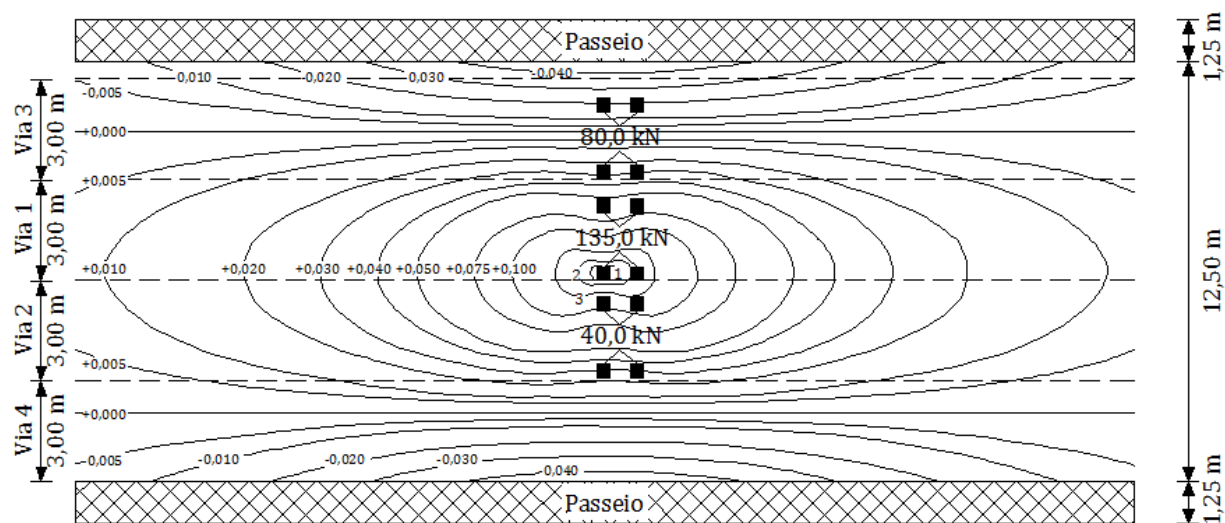
- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS



- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL

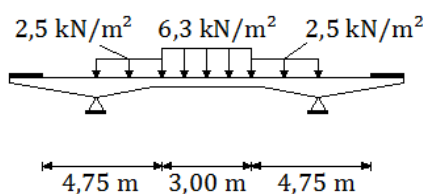


- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS.



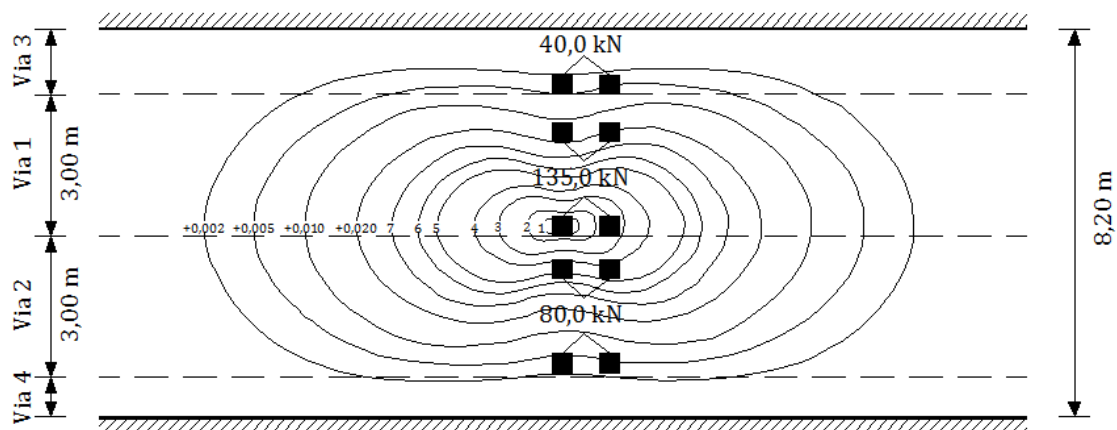
Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150.

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL



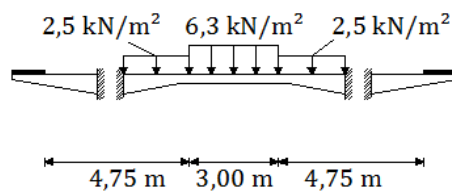
- Secção de apoio;

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS.



Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: 0,030.

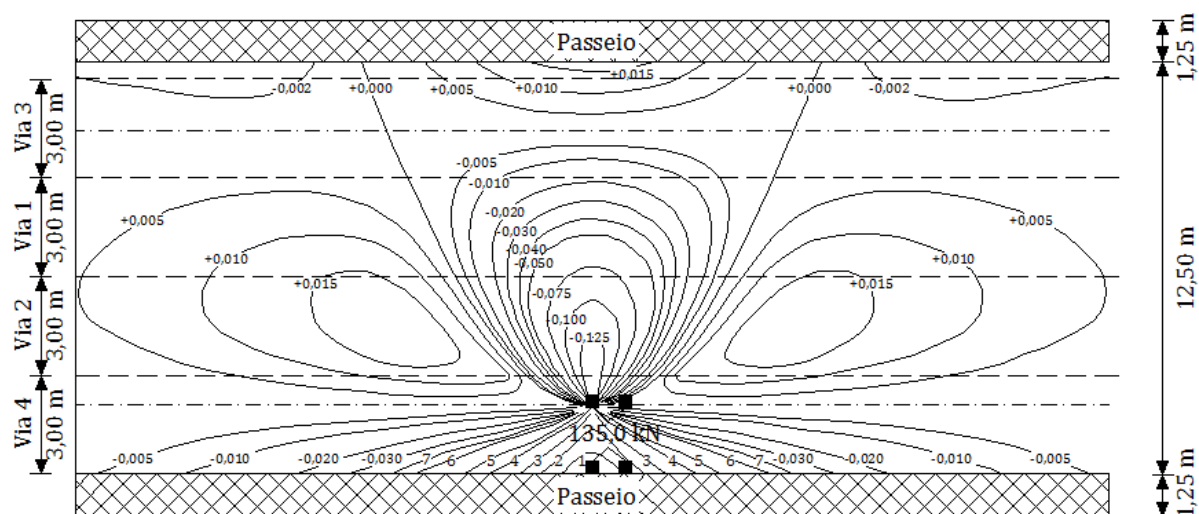
- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL



- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola

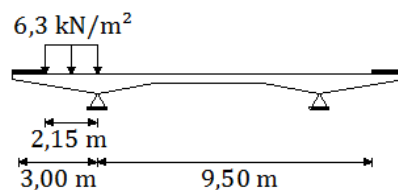
– Secção de meio vão;

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS.



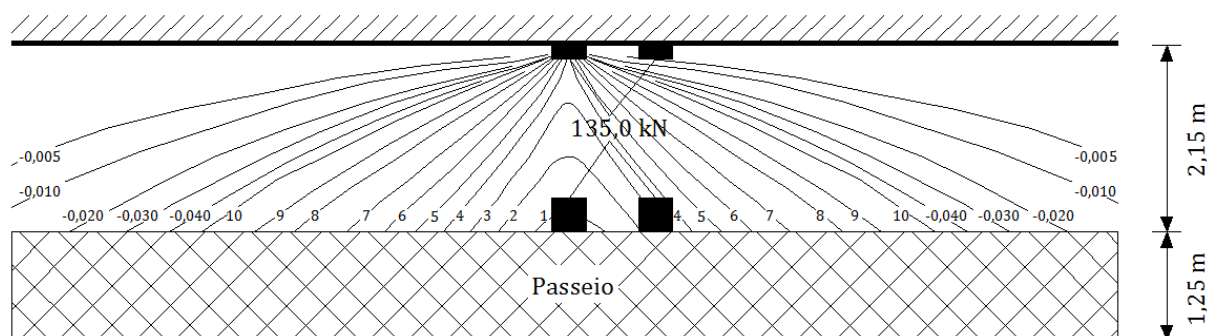
Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL



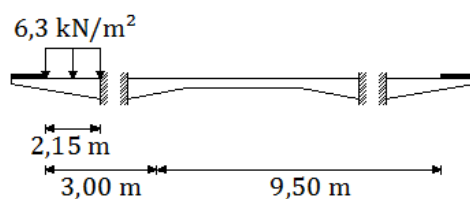
– Secção de apoio;

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS.



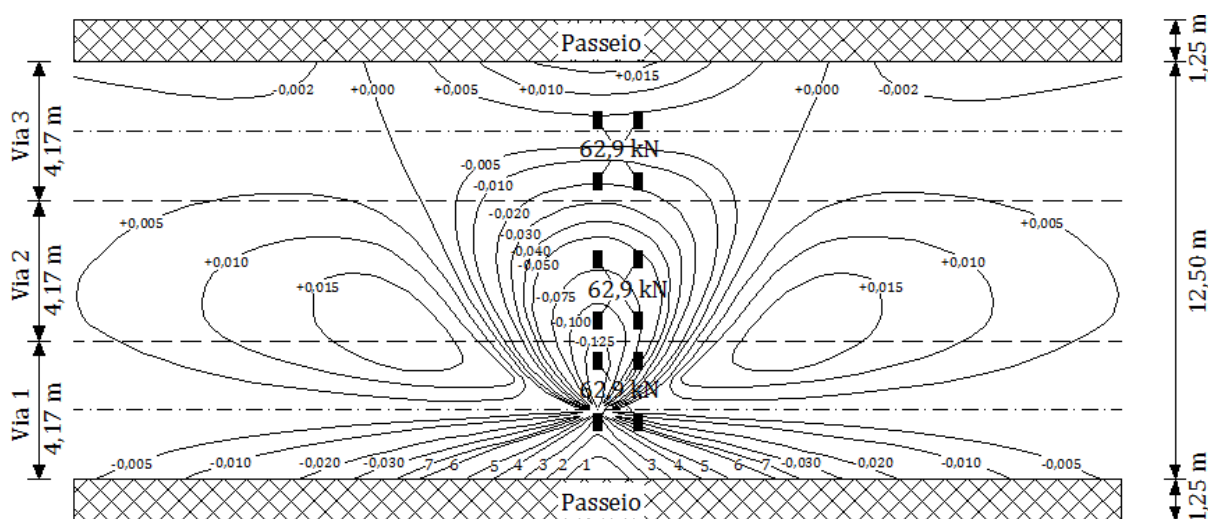
Legenda – 1: +0,400; 2: +0,350; 3: +0,300; 4: +0,250; 5: +0,200; 6: +0,150; 7: +0,100; 8: +0,075; 9: +0,050; 10: +0,040.

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL



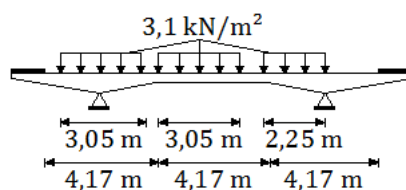
AASHTO

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
– Secção de meio vão;
 - Veículo H20 – 44.

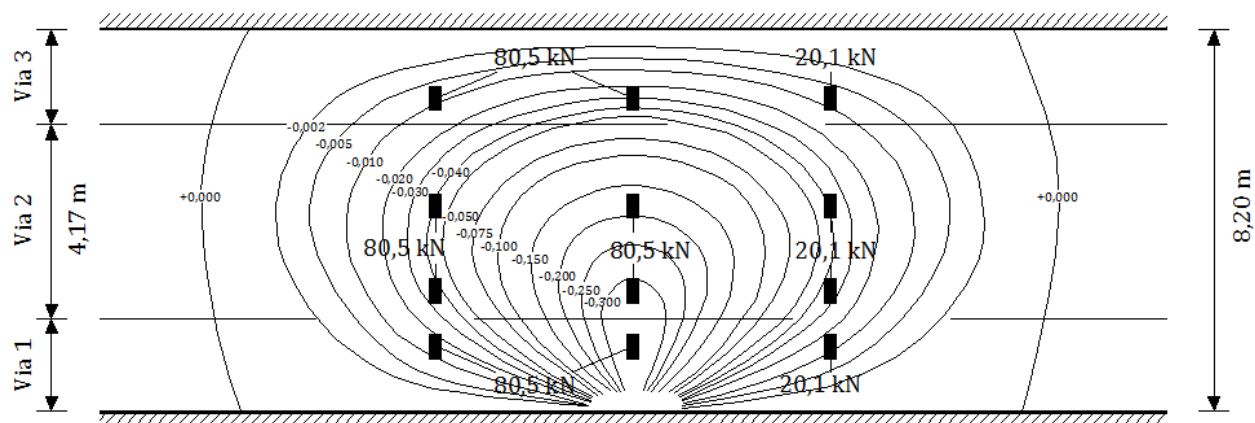


Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

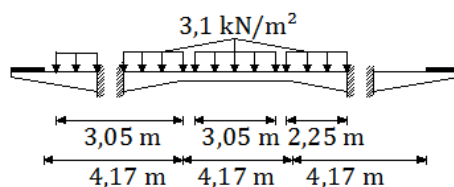
- Sobrecarga uniforme.



- Secção de apoio;
- Veículo HS20 – 44.

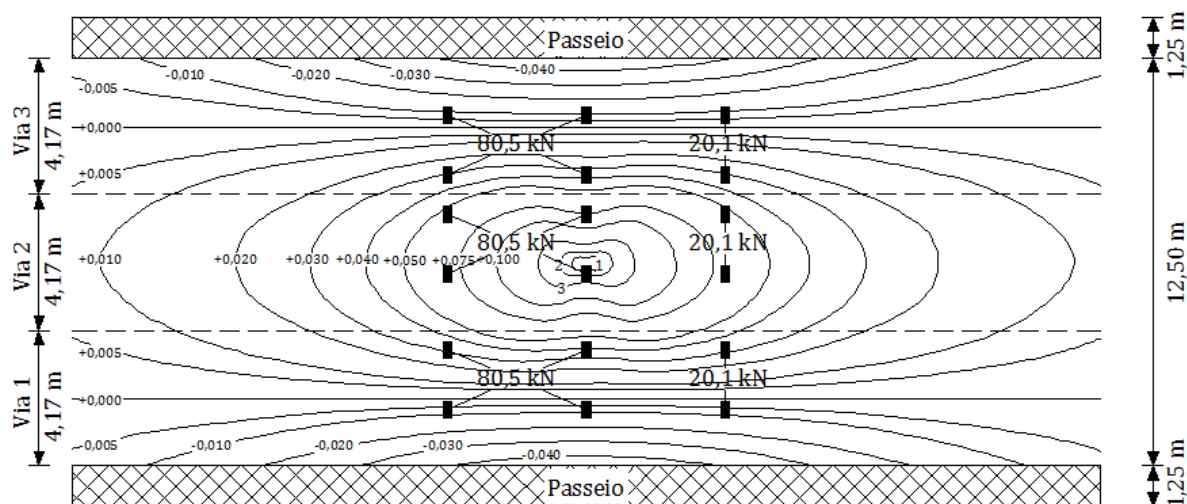


- Sobrecarga uniforme.



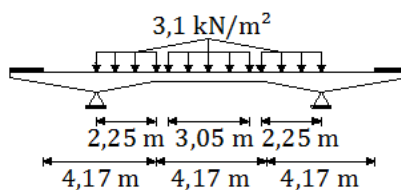
- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas

- Secção de meio vão;
- Veículo HS20 – 44.

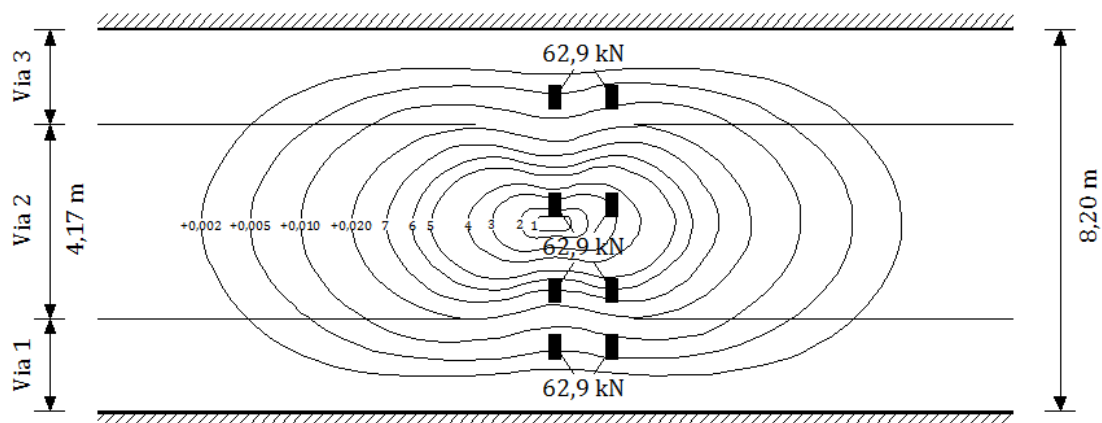


Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150.

- Sobrecarga uniforme.

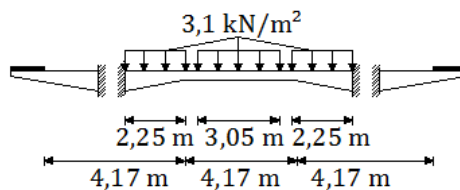


- Secção de apoio;
- Veículo H20 – 44.



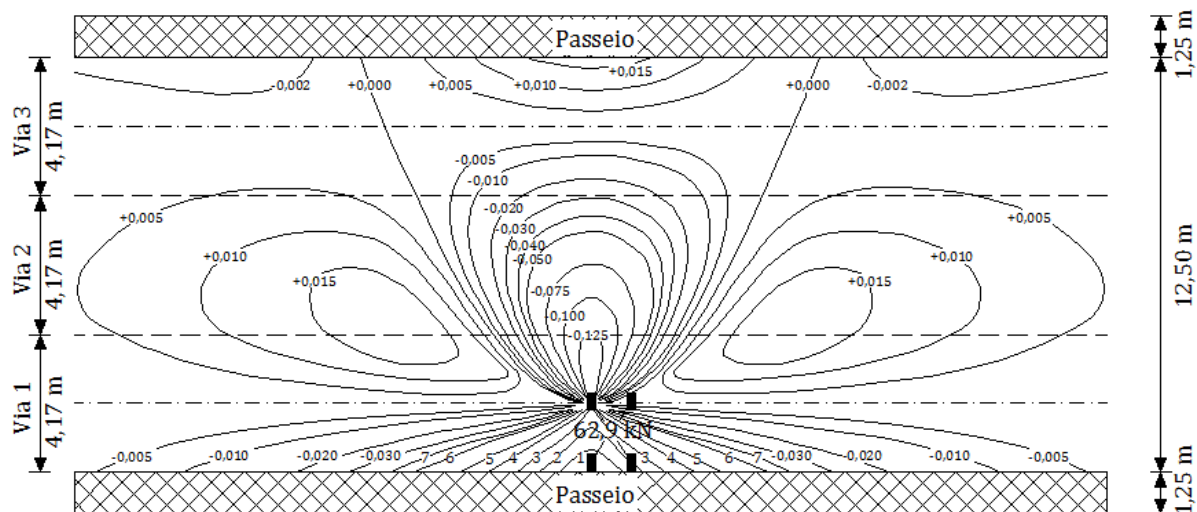
Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: 0,030.

- Sobrecarga uniforme.



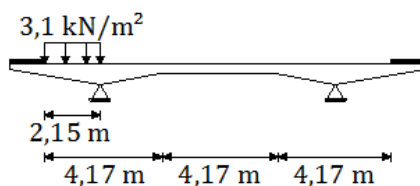
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola

- Secção de meio vão;
- Veículo H20 – 44.



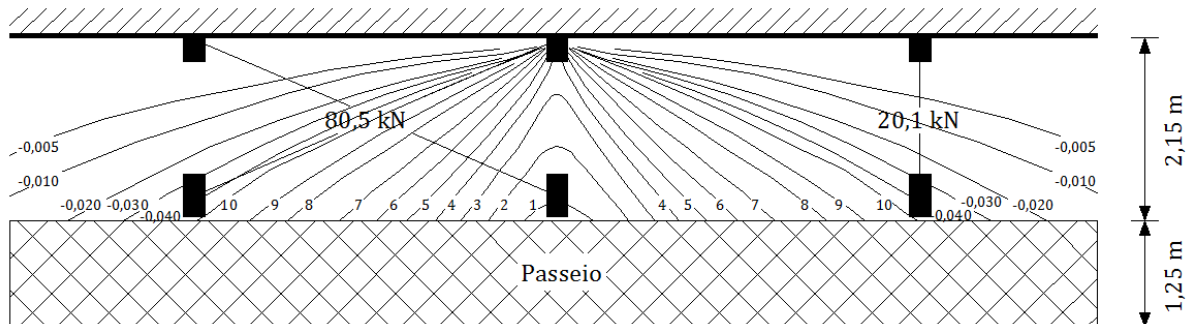
Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Sobrecarga uniforme.



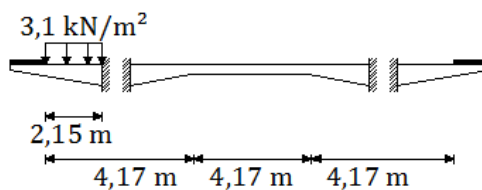
– Secção de apoio;

- Veículo HS20 – 44.



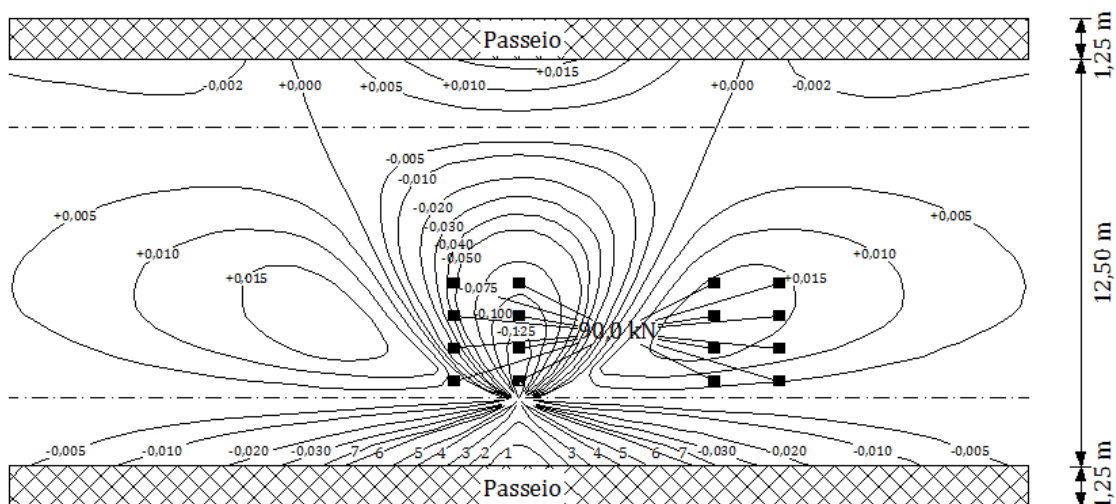
Legenda – 1: +0,400; 2: +0,350; 3: +0,300; 4: +0,250; 5: +0,200; 6: +0,150; 7: +0,100; 8: +0,075; 9: +0,050; 10: +0,040.

- Sobrecarga uniforme.



SATCC

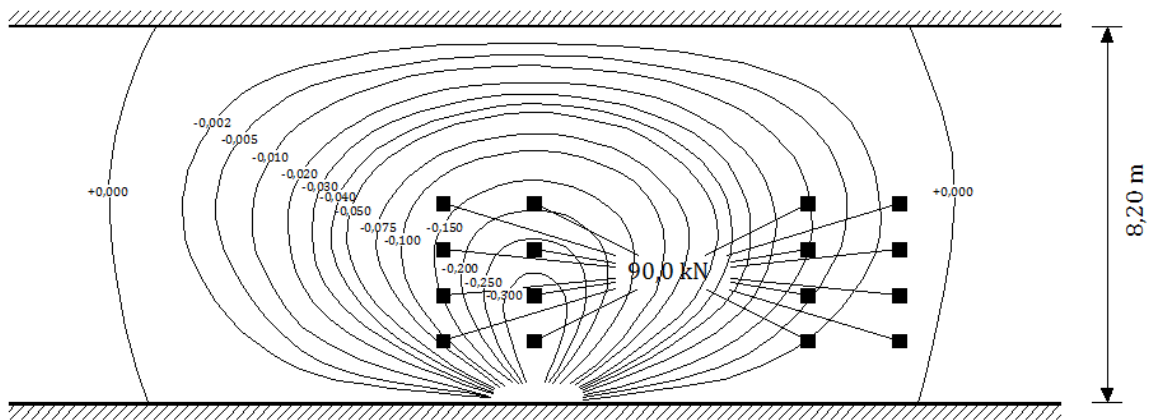
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga NB.



Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

– Secção de apoio;

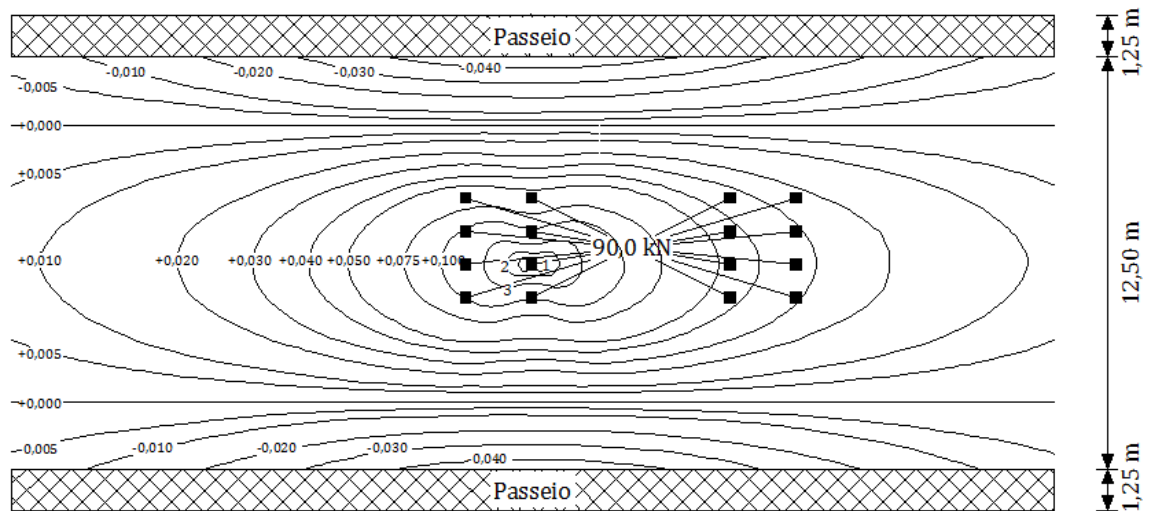
- Modelo de sobrecarga NB.



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas

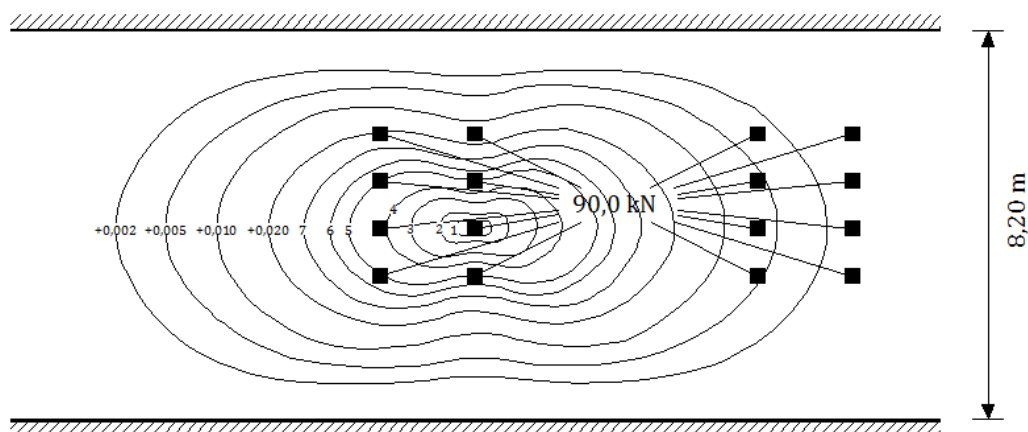
– Secção de meio vão;

- Modelo de sobrecarga NB.



Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150.

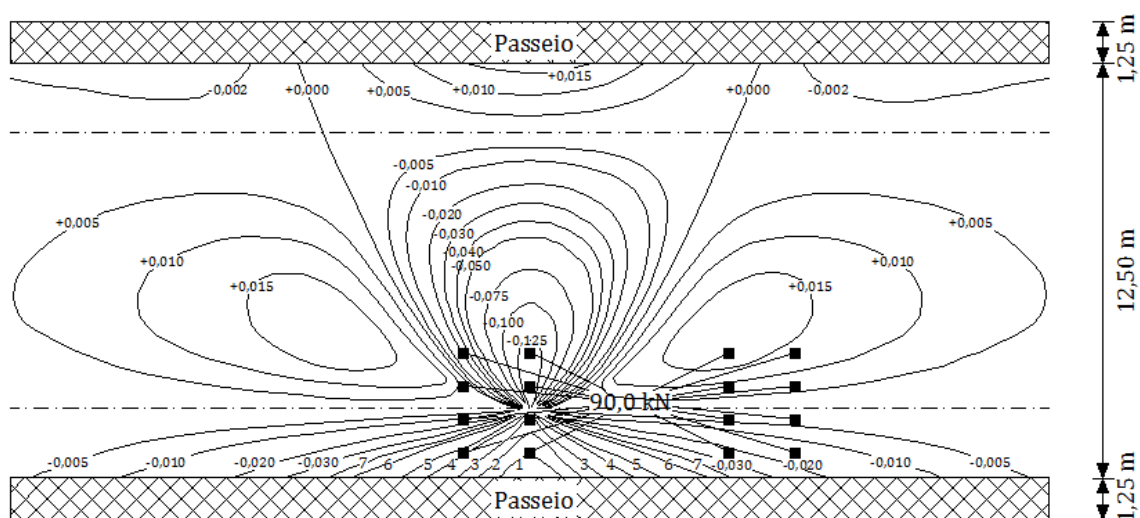
- Secção de apoio;
- Modelo de sobrecarga NB.



Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: 0,030.

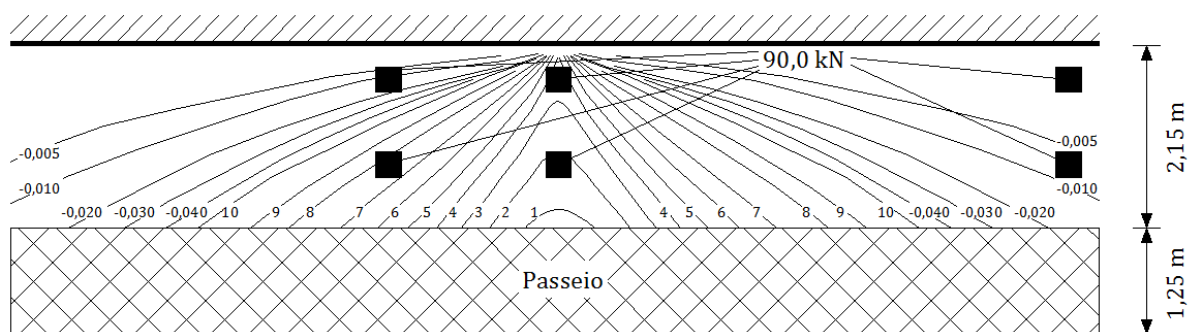
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola

- Secção de meio vão;
- Modelo de sobrecarga NB.



Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

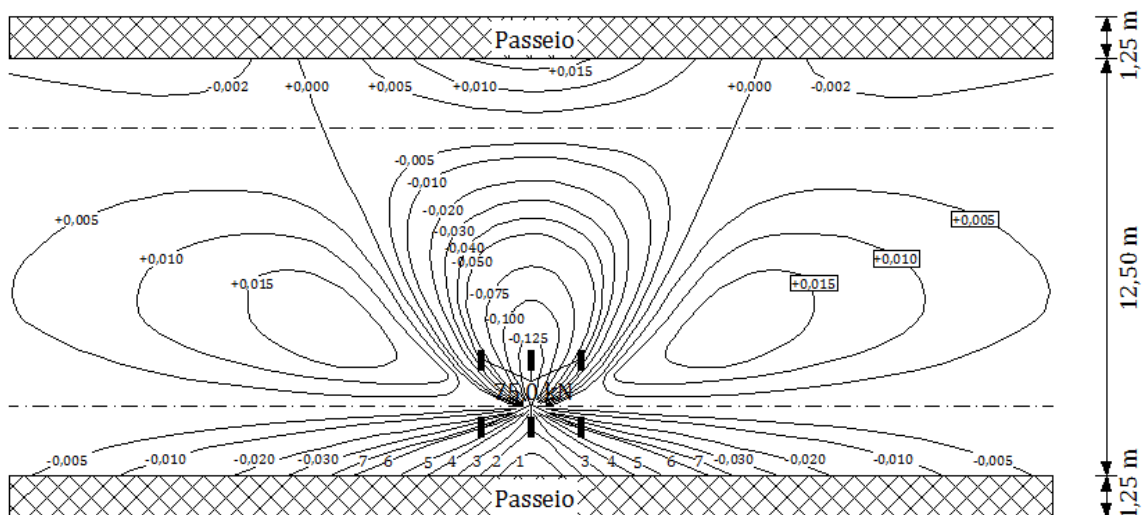
- Secção de apoio;
- Modelo de sobrecarga NB.



Legenda – 1: +0,400; 2: +0,350; 3: +0,300; 4: +0,250; 5: +0,200; 6: +0,150; 7: +0,100; 8: +0,075; 9: +0,050; 10: +0,040.

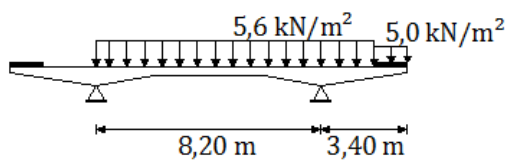
ABNT

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.

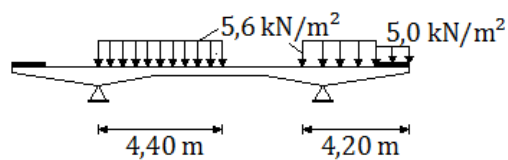


Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Sobrecarga uniforme.



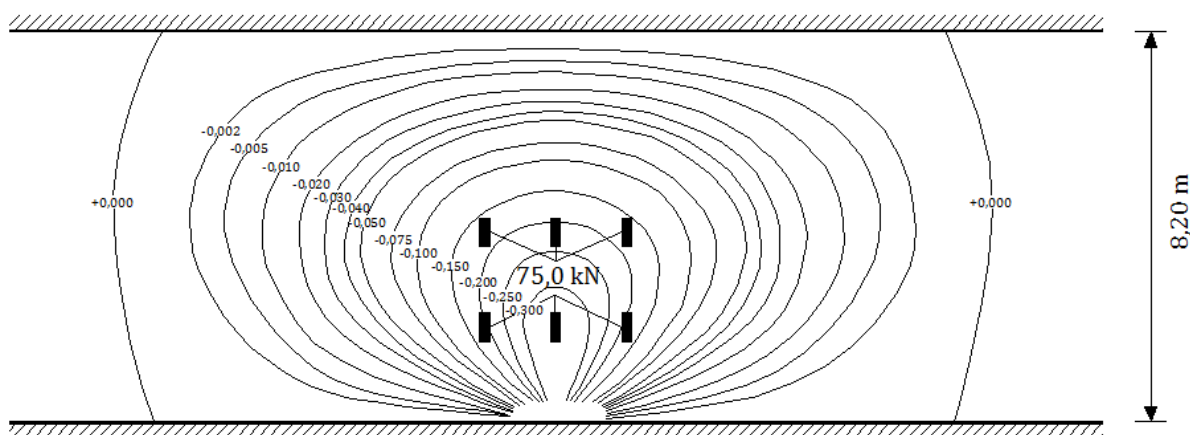
Secção sem veículo



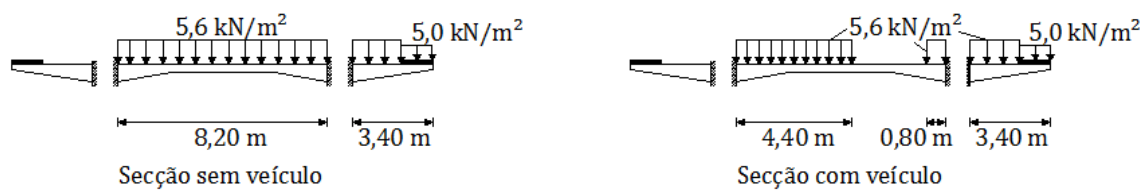
Secção com veículo

– Secção de apoio;

- Veículo tipo.



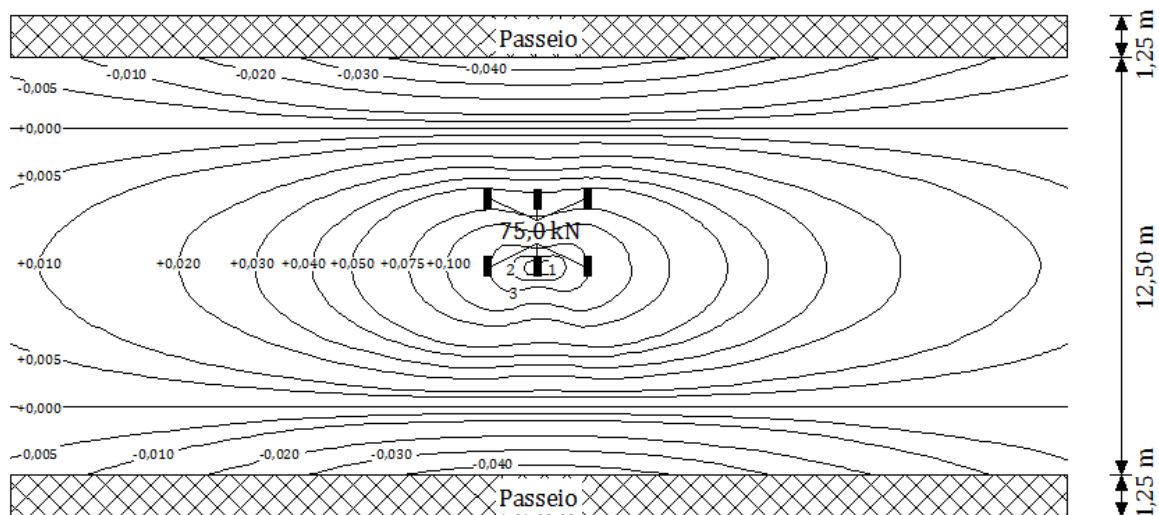
- Sobrecarga uniforme.



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas

– Secção de meio vão;

- Veículo tipo.



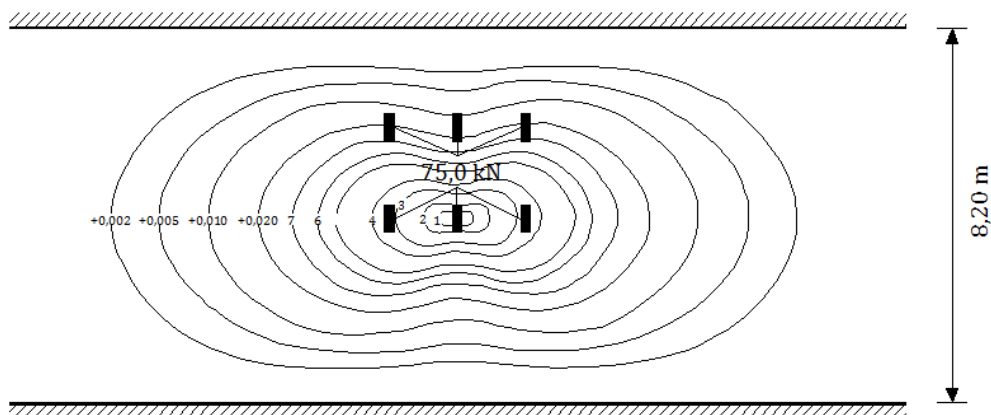
Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150.

- Sobrecarga uniforme.



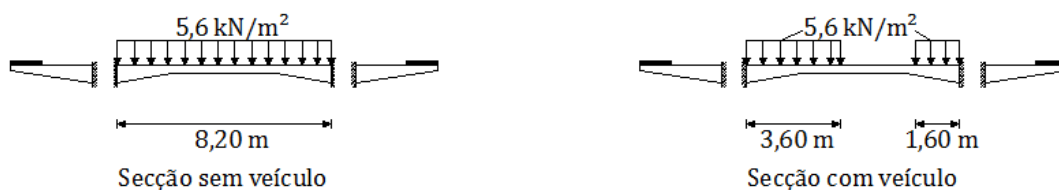
– Secção de apoio;

- Veículo tipo.

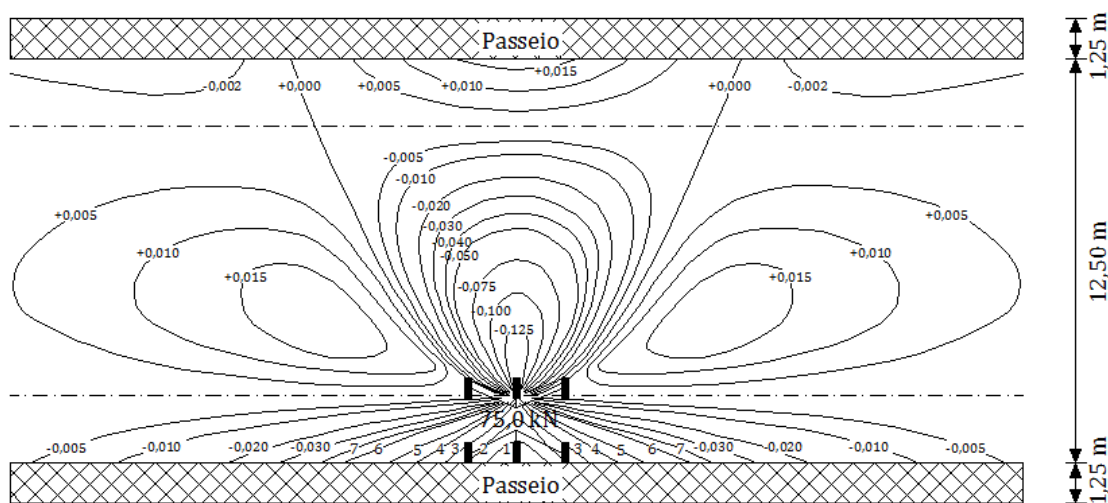


Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: 0,030.

- Sobrecarga uniforme.

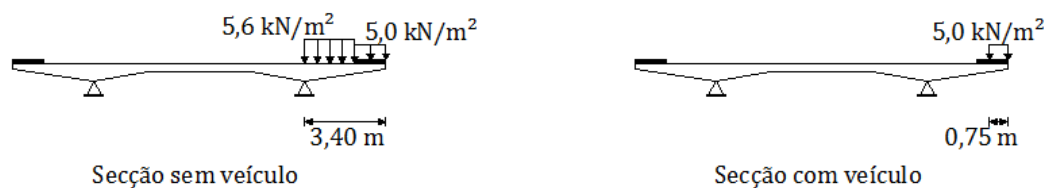


- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.

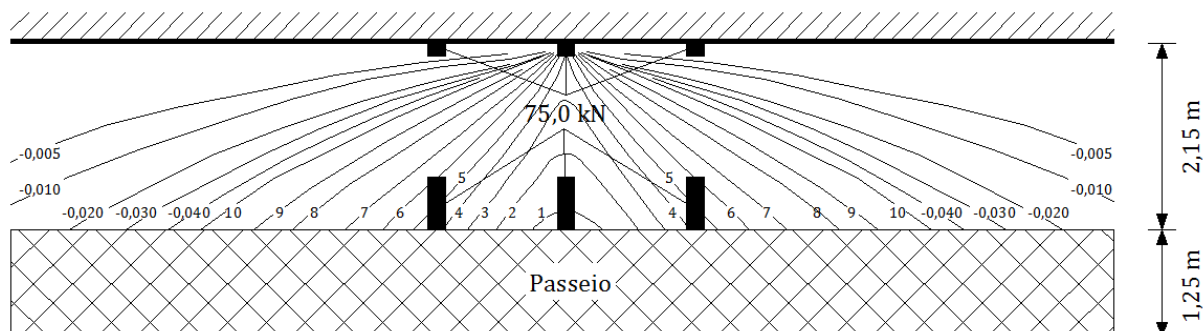


Legenda – 1: -0,200; 2: -0,150; 3: -0,100; 4: -0,075; 5: -0,050; 6: -0,040; 7: -0,030.

- Sobrecarga uniforme.

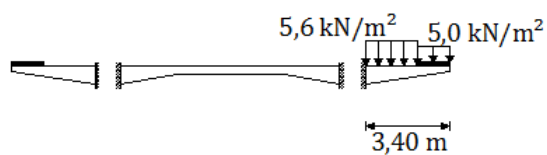


- Secção de apoio;
- Veículo tipo.

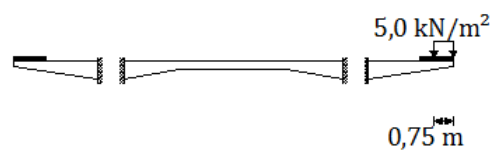


Legenda – 1: +0,400; 2: +0,350; 3: +0,300; 4: +0,250; 5: +0,200; 6: +0,150; 7: +0,100; 8: +0,075; 9: +0,050; 10: +0,040.

- Sobrecarga uniforme.



Secção sem veículo



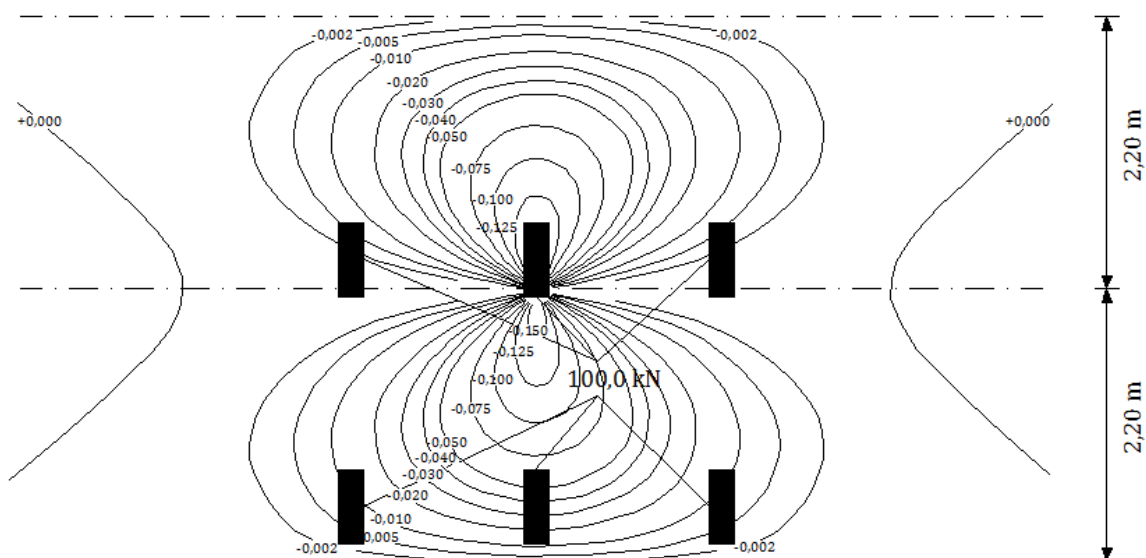
Secção com veículo

A2.3 – Caso de estudo 3

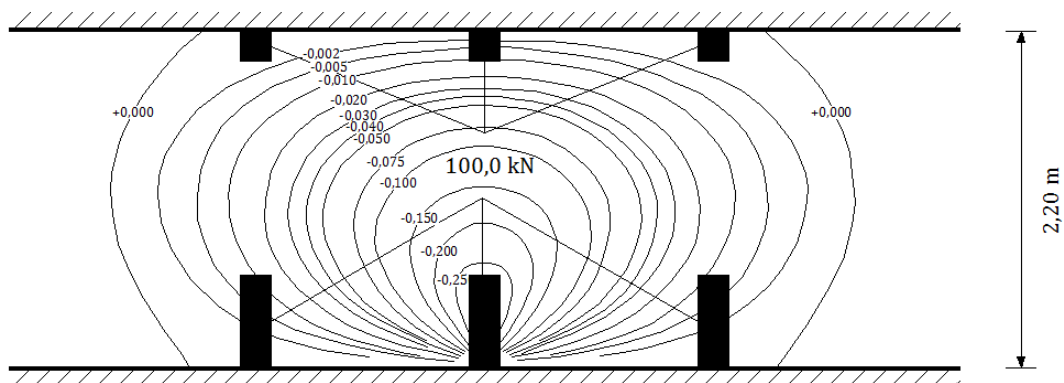
Neste caso de estudo o coeficiente de encastramento parcial α toma o valor de 0. Assim, os resultados obtidos na secção apoiada correspondem aos valores adoptados na secção de meio vão e os resultados obtidos na secção encastrada correspondem aos valores adotados na secção de apoio.

RSA

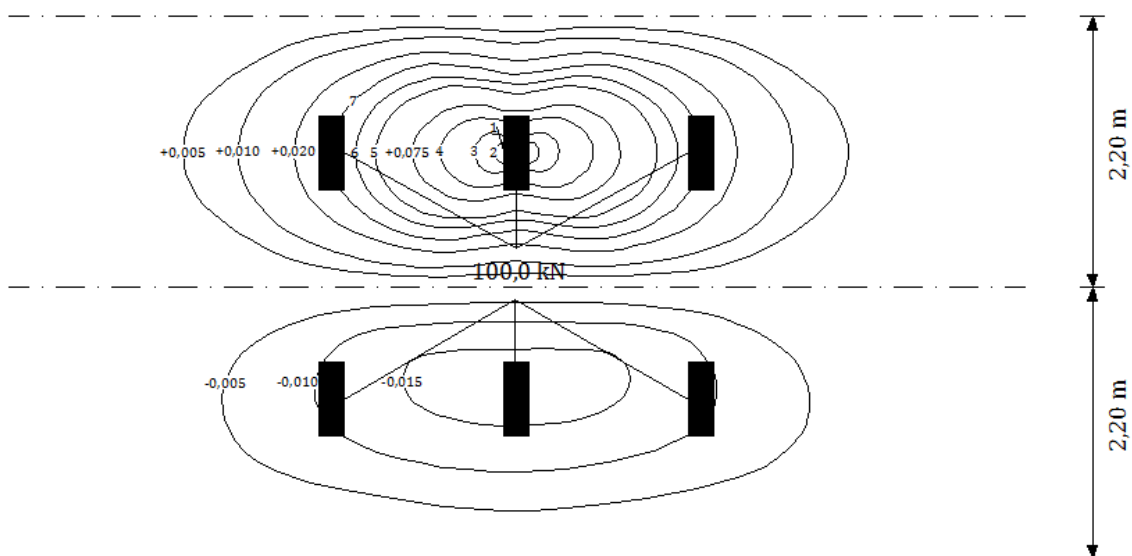
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.



- Secção de apoio;
- Veículo tipo.

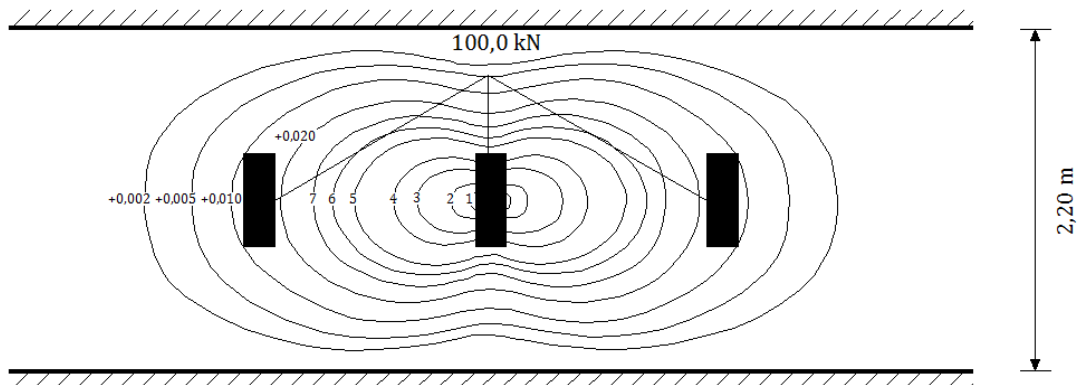


- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
- Secção de meio vão;
- Veículo tipo.



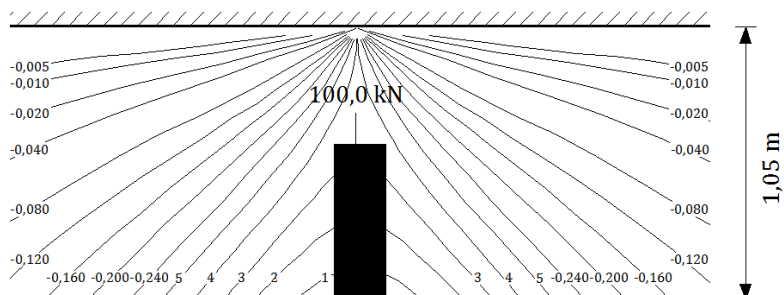
Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150; 4: +0,100; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Secção de apoio;
- Veículo tipo.



Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,750; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

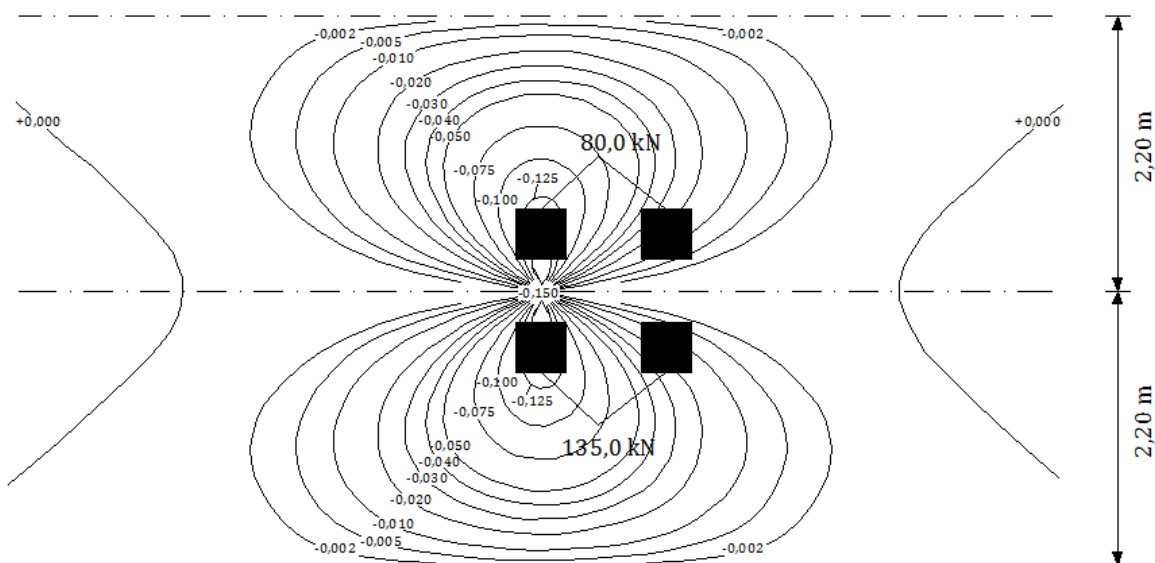
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola
 - Veículo tipo.



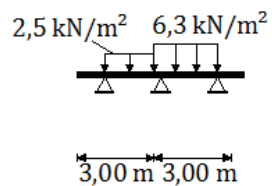
Legenda – 1: +0,440; 2: +0,400; 3: +0,360; 4: +0,320; 5: +0,280.

EC1

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS

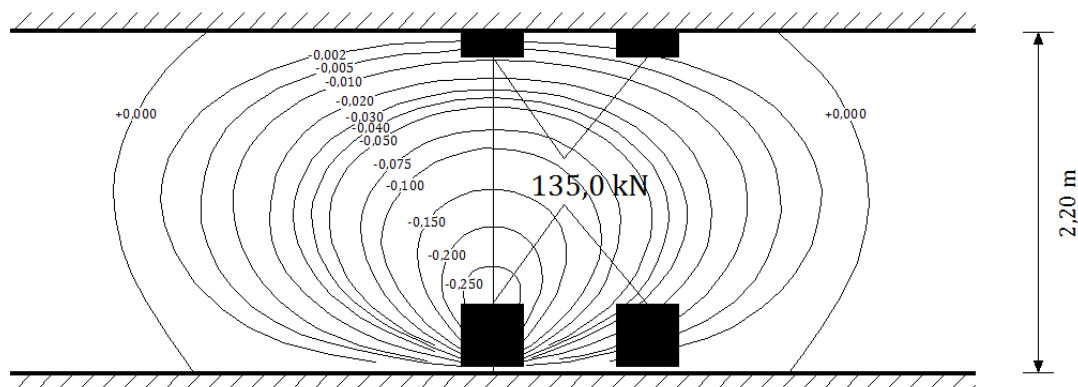


- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL

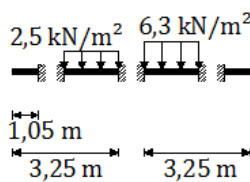


– Secção de apoio;

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS



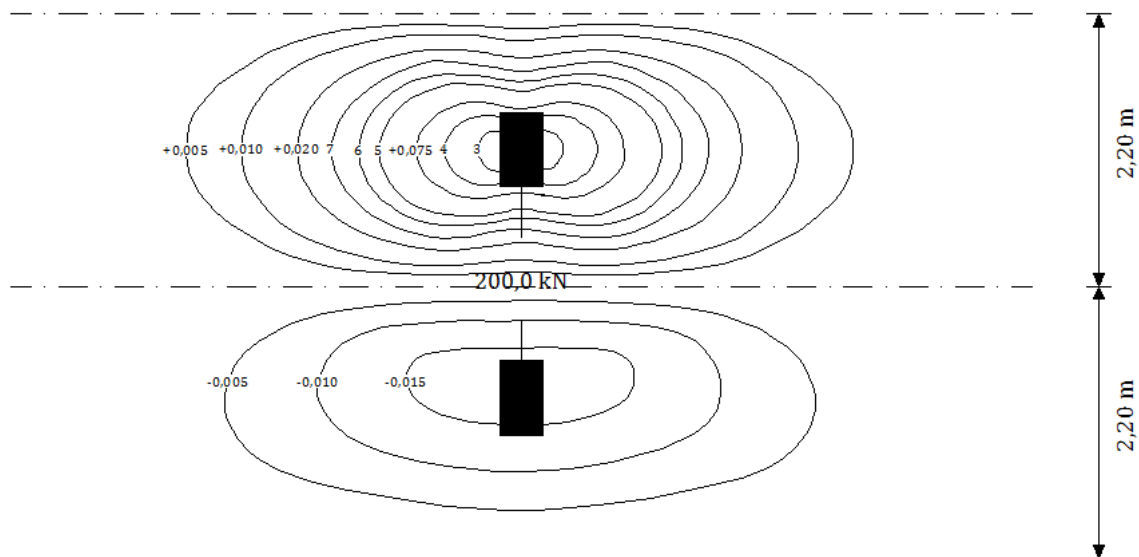
- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas

– Secção de meio vão;

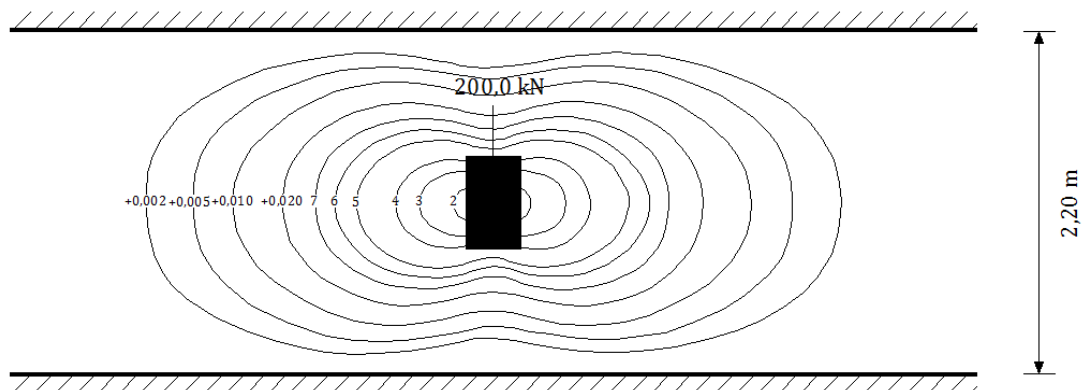
- Modelo de sobrecarga LM2.



Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150; 4: +0,100; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

– Secção de apoio;

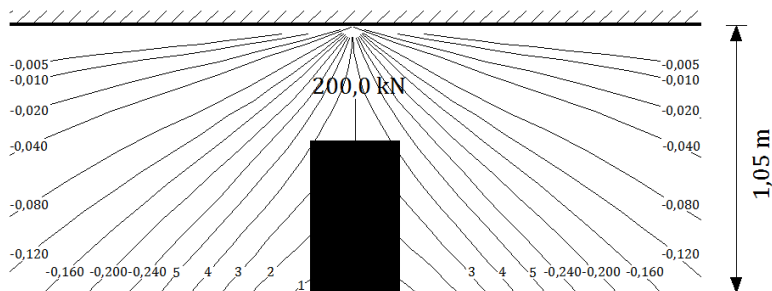
- Modelo de sobrecarga LM2.



Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola

- Modelo de sobrecarga LM2.



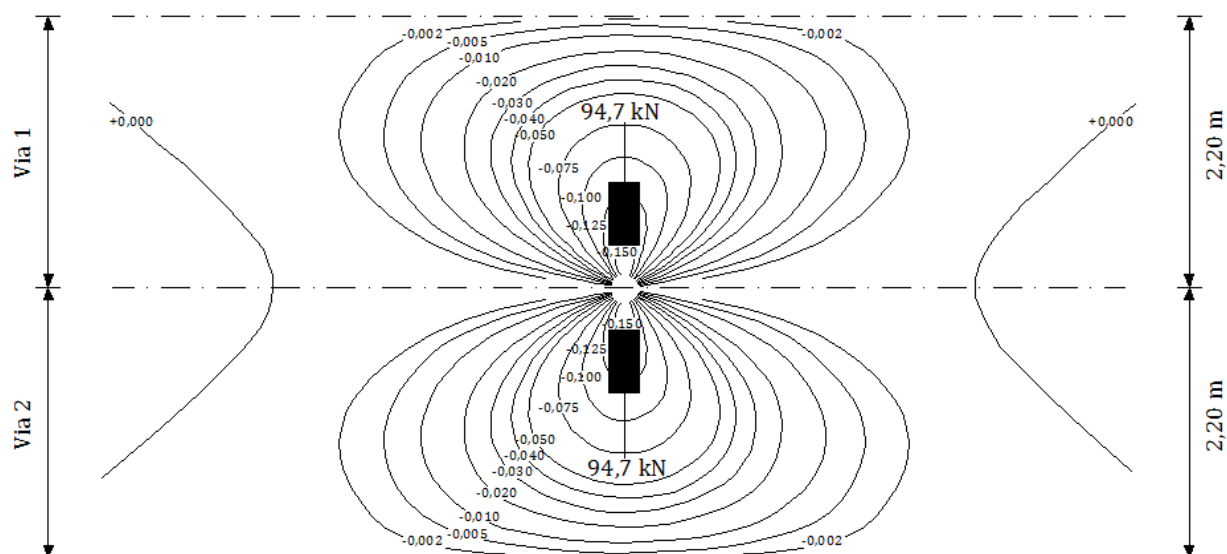
Legenda – 1: +0,440; 2: +0,400; 3: +0,360; 4: +0,320; 5: +0,280.

AASHTO

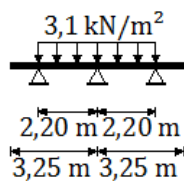
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas

– Secção de meio vão;

- Veículo HS20 – 44.

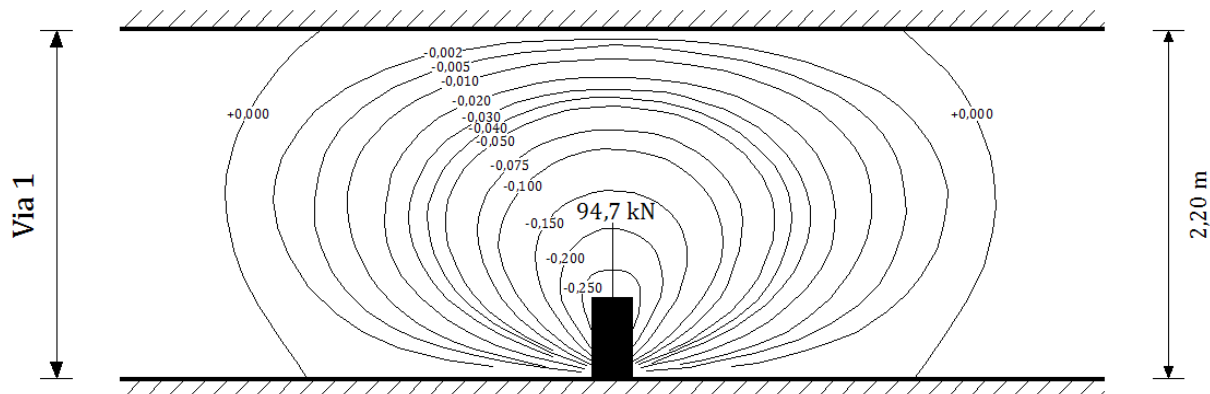


- Sobrecarga uniforme.

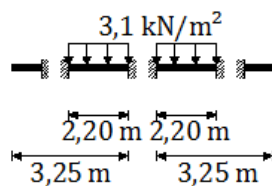


– Secção de apoio;

- Veículo HS20 – 44.



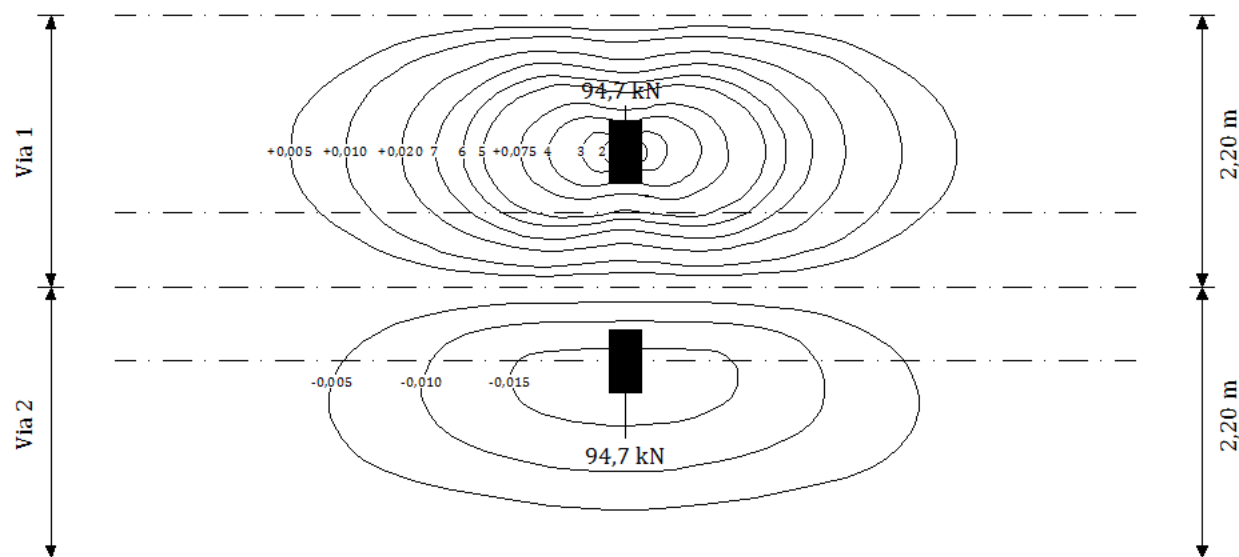
- Sobrecarga uniforme.



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas

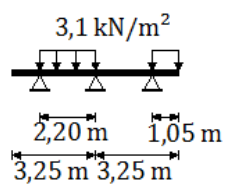
– Secção de meio vão;

- Veículo HS20 – 44.



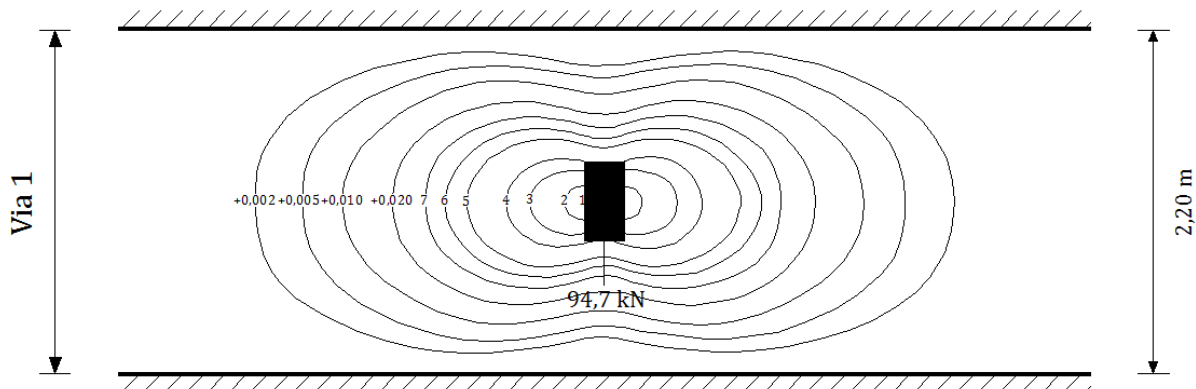
Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150; 4: +0,100; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Sobrecarga uniforme.



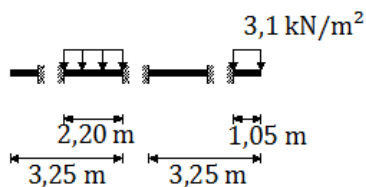
– Seção de apoio;

- Veículo HS20 – 44.



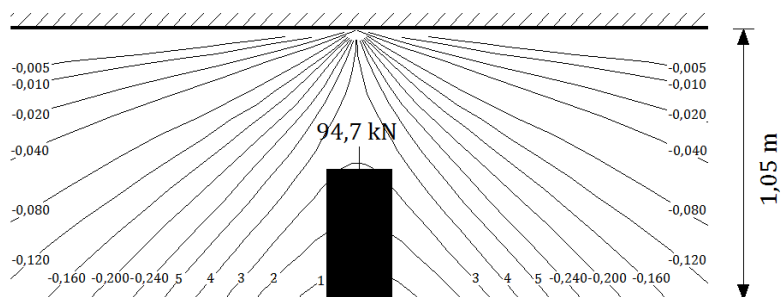
Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,750; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Sobrecarga uniforme.



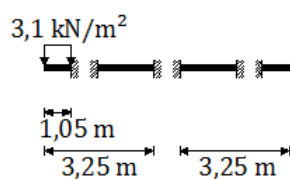
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola

- Veículo HS20 – 44.



Legenda – 1: +0,440; 2: +0,400; 3: +0,360; 4: +0,320; 5: +0,280.

- Sobrecarga uniforme.

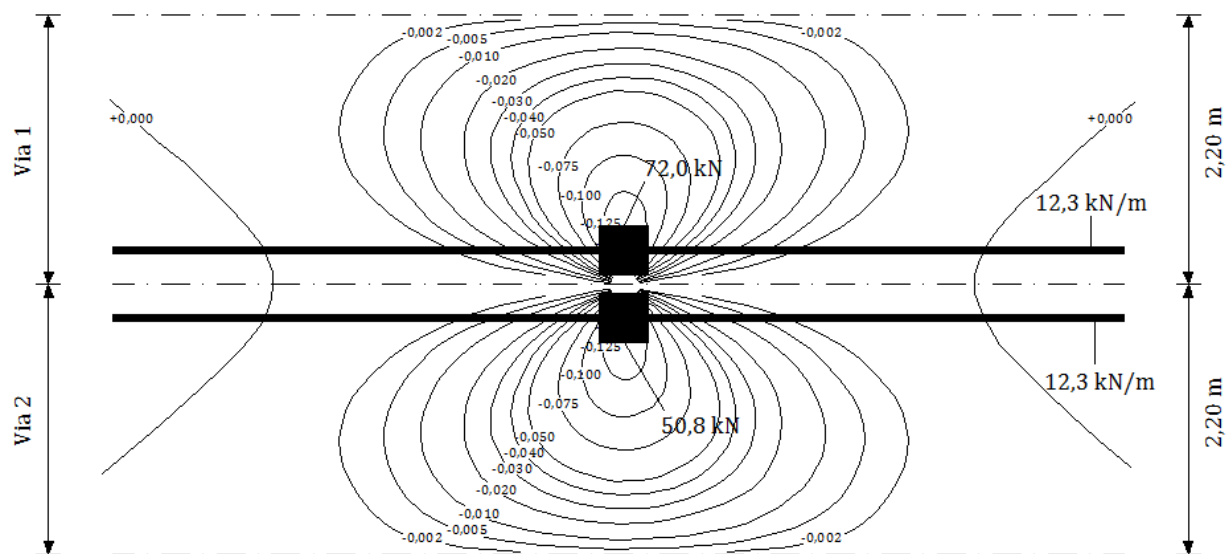


SATCC

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas

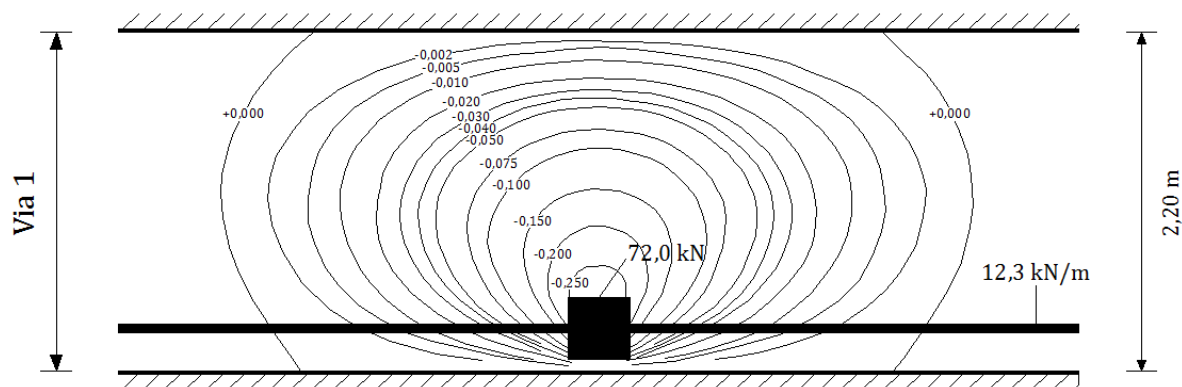
– Secção de meio vão;

- Modelo de sobrecarga NA – (1) + (2).

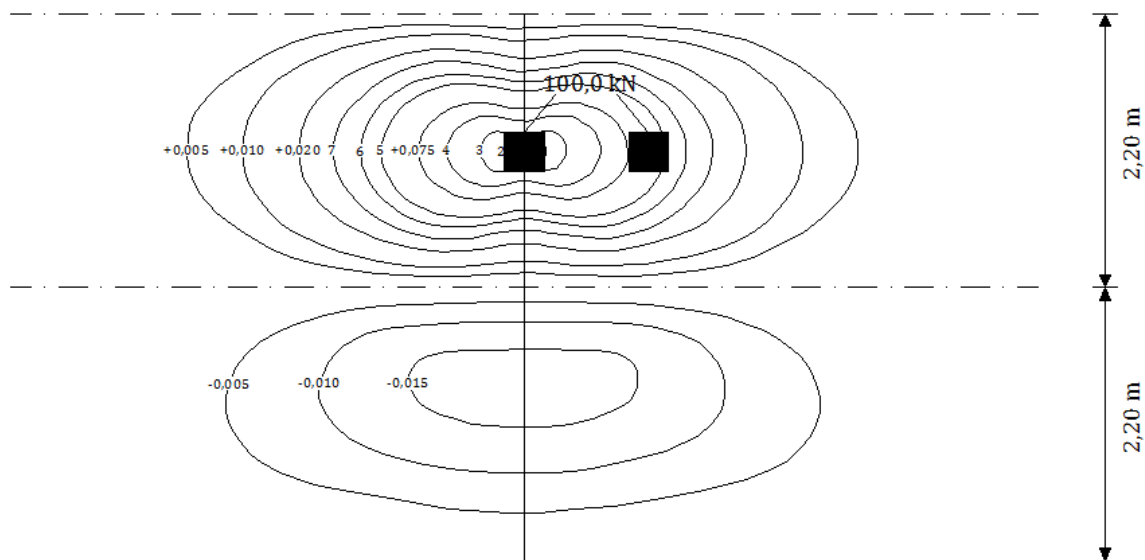


– Secção de apoio.

- Modelo de sobrecarga NA – (1) + (2).

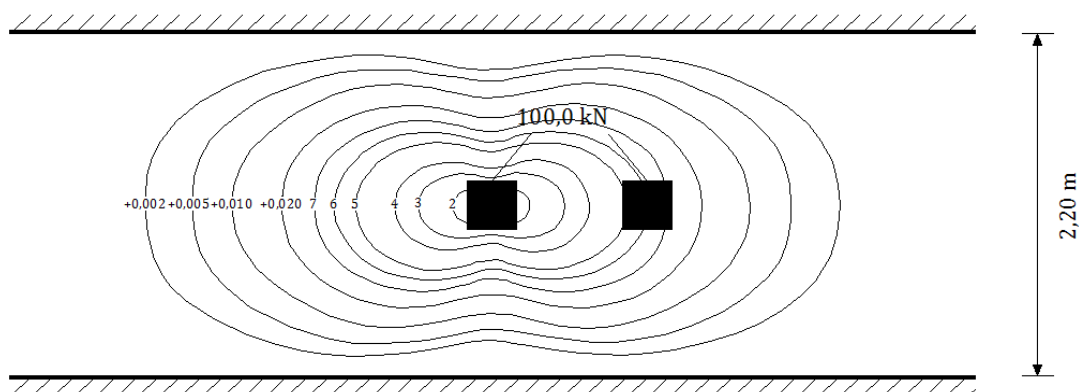


- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga NA – (3).



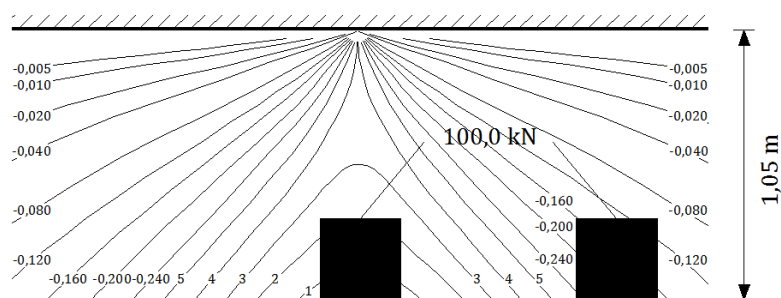
Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150; 4: +0,100; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Secção de apoio;
- Modelo de sobrecarga NA – (3).



Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,750; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

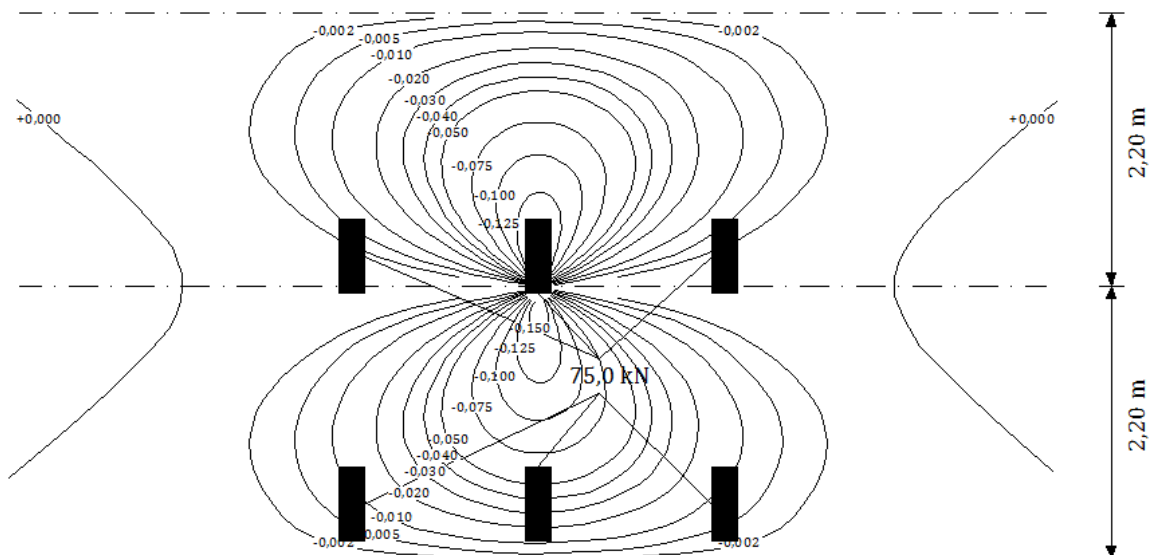
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola
 - Modelo de sobrecarga NA – (3).



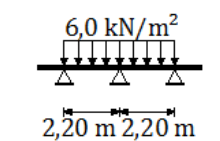
Legenda – 1: +0,440; 2: +0,400; 3: +0,360; 4: +0,320; 5: +0,280.

ABNT

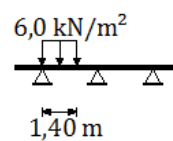
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.



- Sobrecarga uniforme.



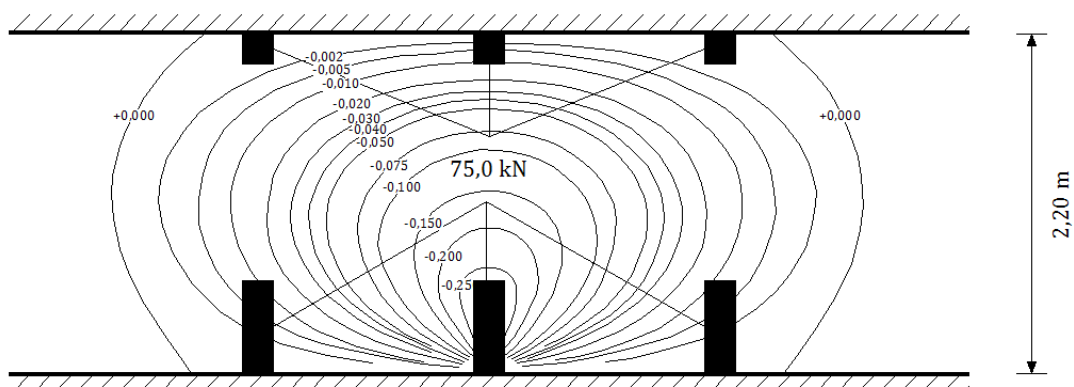
Secção sem veículo



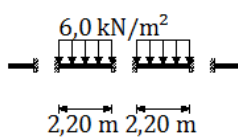
Secção com veículo

- Secção de apoio;

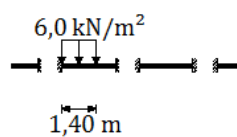
- Veículo tipo.



- Sobrecarga uniforme.

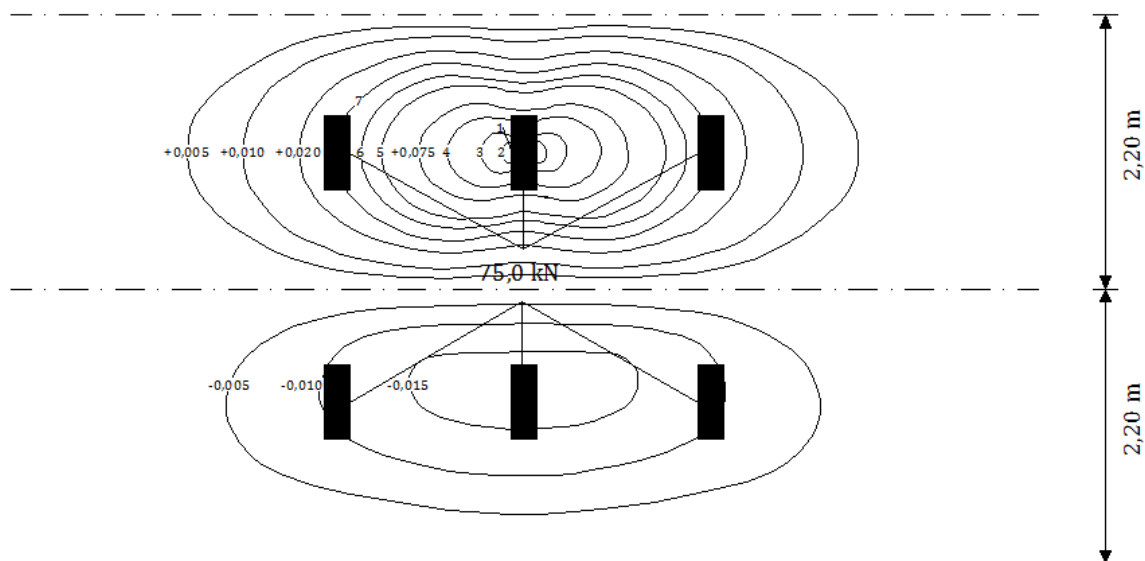


Secção sem veículo



Secção com veículo

- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.

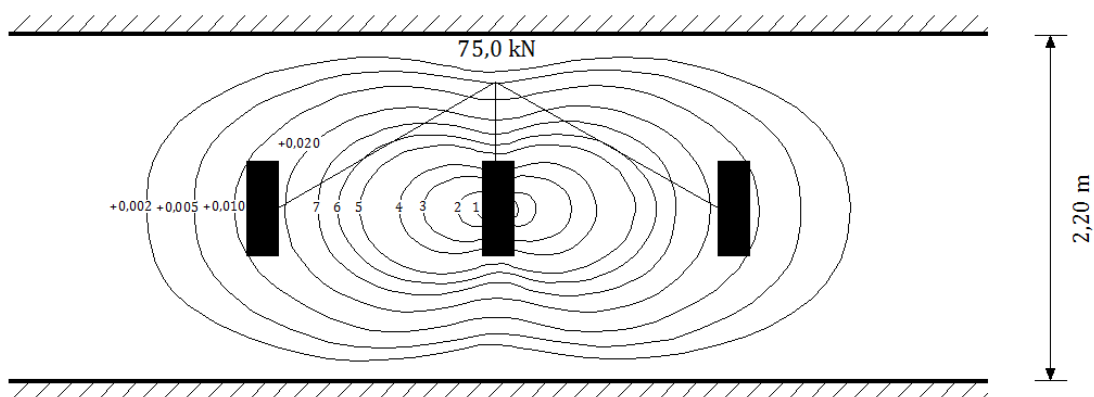


Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150; 4: +0,100; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Sobrecarga uniforme.

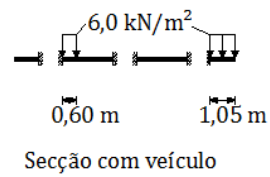
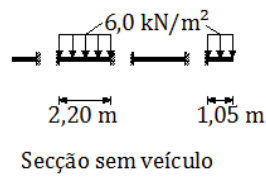


- Secção de apoio;
- Veículo tipo.



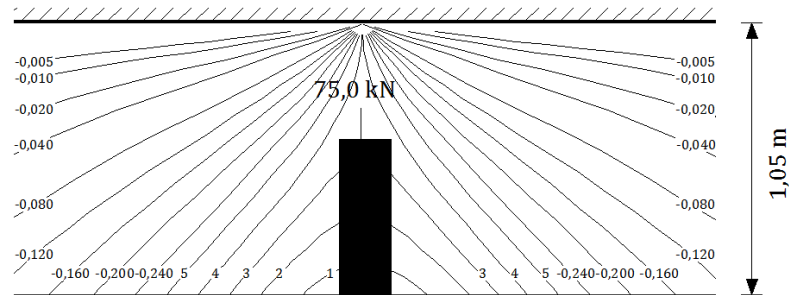
Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Sobrecarga uniforme.



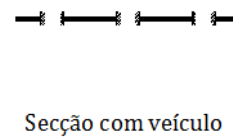
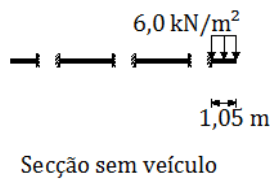
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola

- Veículo tipo.



Legenda – 1: +0,440; 2: +0,400; 3: +0,360; 4: +0,320; 5: +0,280.

- Sobrecarga uniforme.

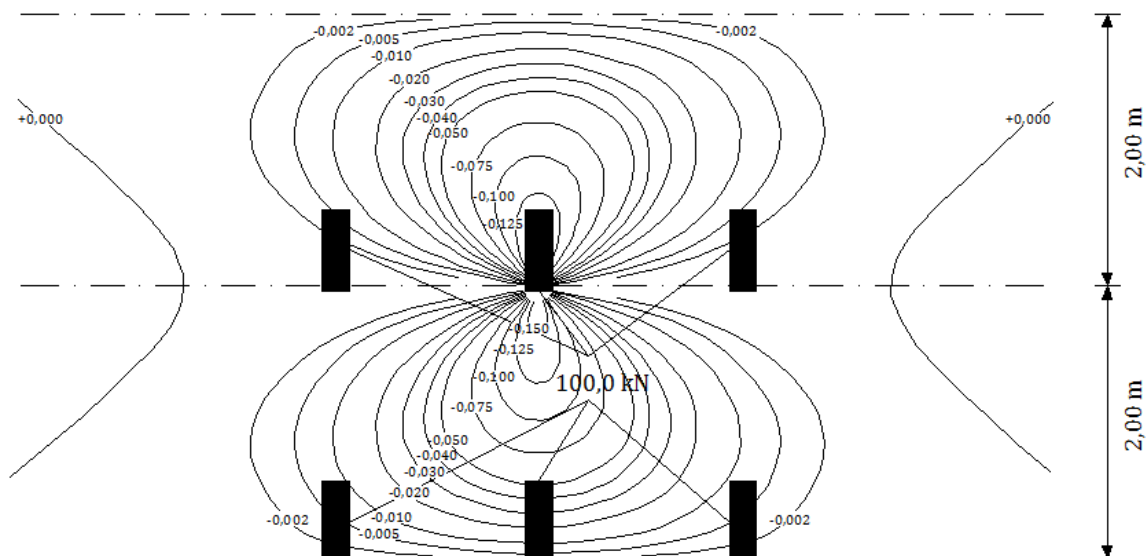


A2.4 – Caso de estudo 4

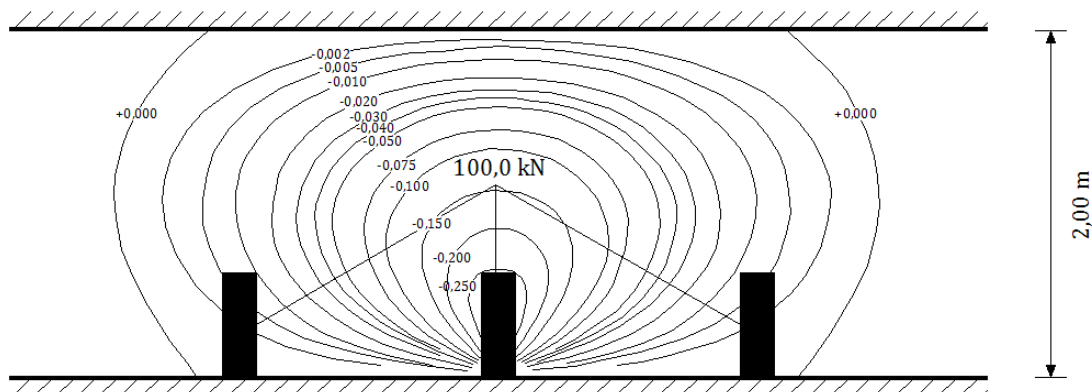
Neste caso de estudo o coeficiente de encastramento parcial α toma o valor de 0. Assim, os resultados obtidos na secção apoiada correspondem aos valores adoptados na secção de meio vão e os resultados obtidos na secção encastrada correspondem aos valores adotados na secção de apoio.

RSA

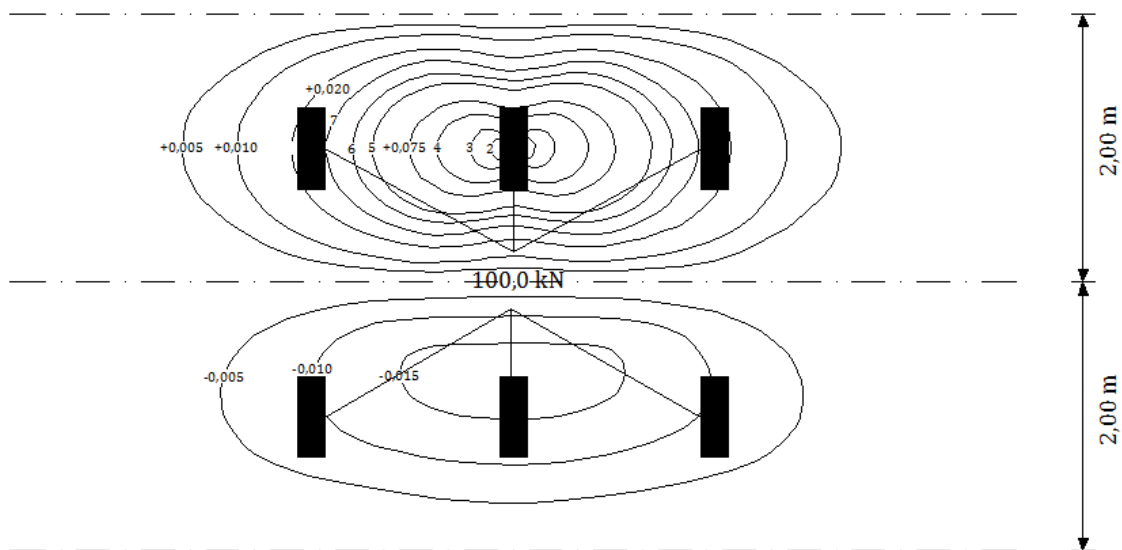
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.



- Secção de apoio;
 - Veículo tipo.

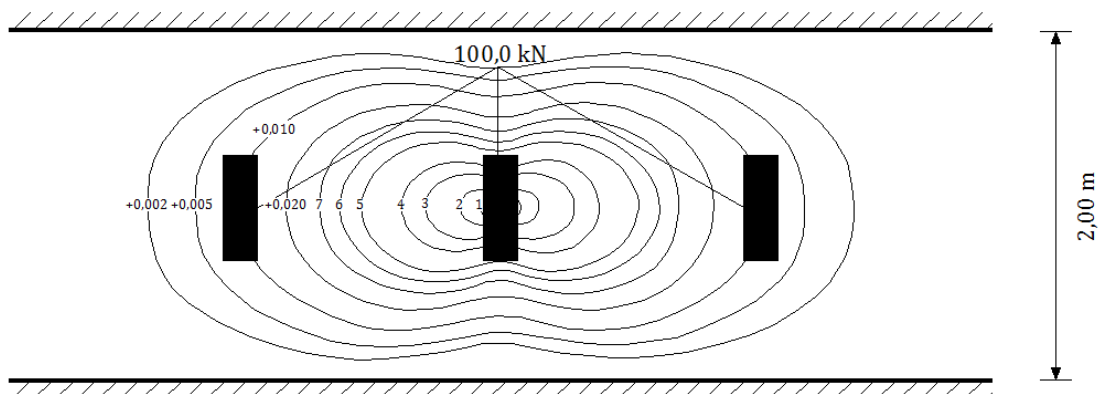


- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.



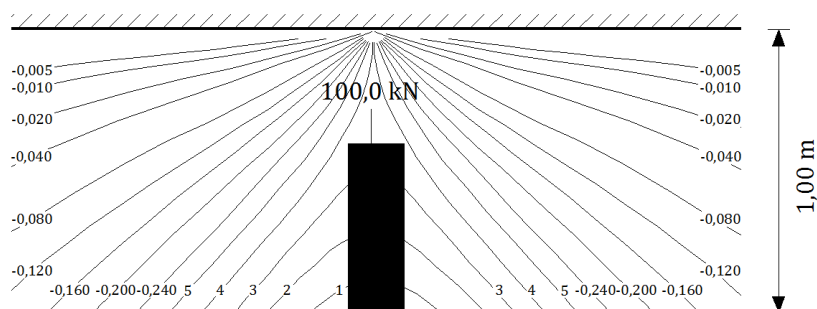
Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150; 4: +0,100; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Secção de apoio;
- Veículo tipo.



Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

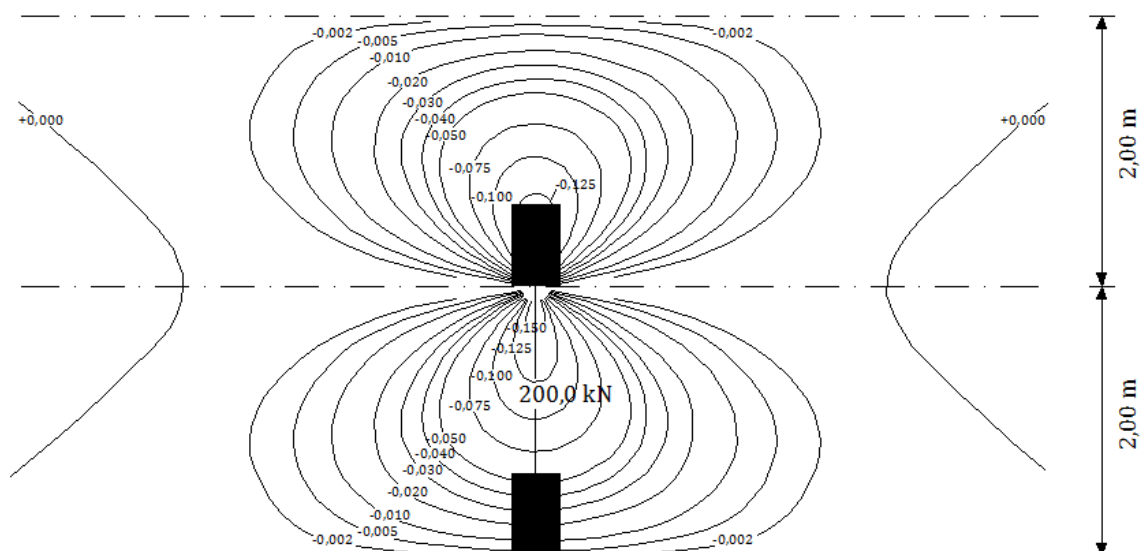
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola
 - Veículo tipo.



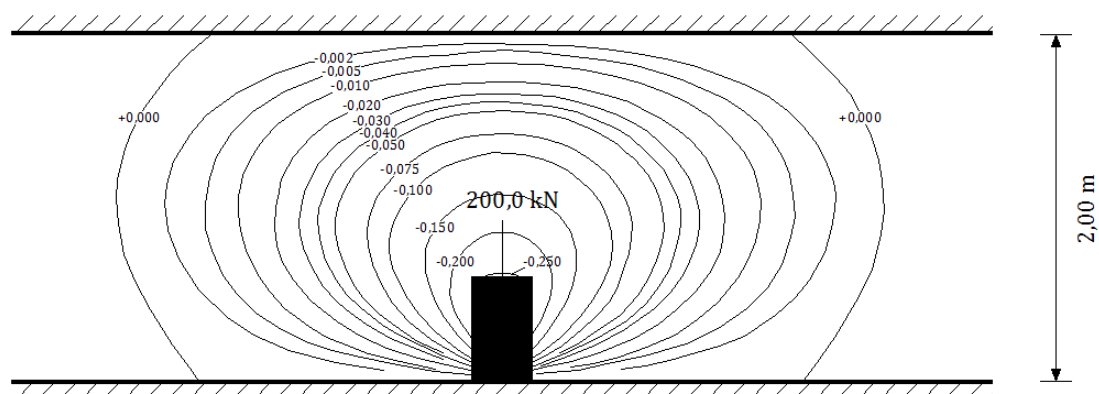
Legenda – 1: +0,440; 2: +0,400; 3: +0,360; 4: +0,320; 5: +0,280.

EC1

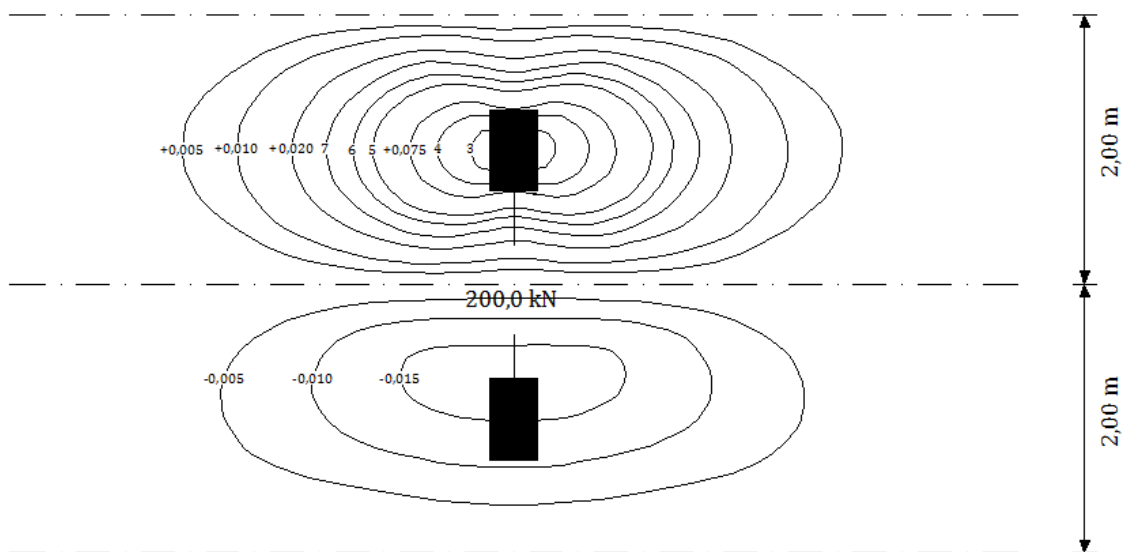
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga LM2.



- Secção de apoio;
 - Modelo de sobrecarga LM2.

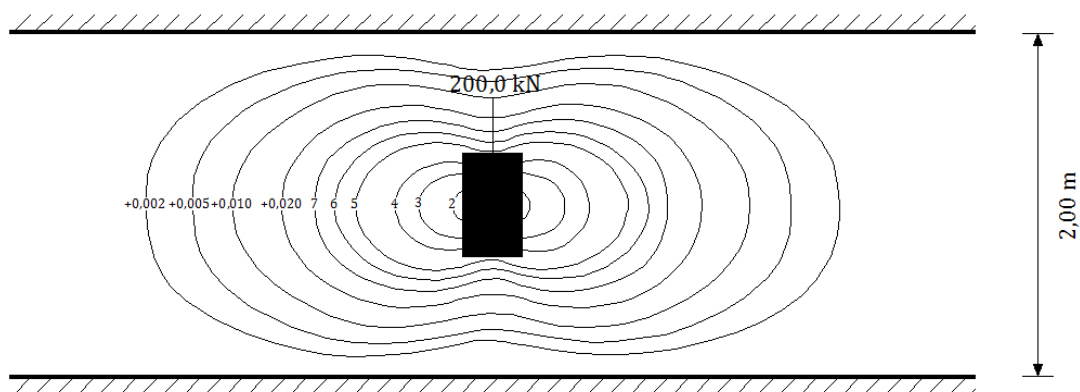


- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga LM2.



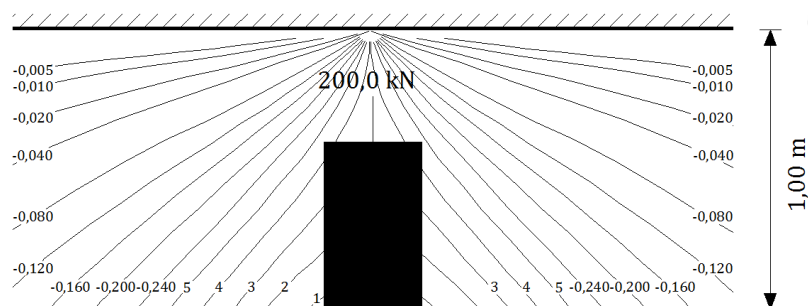
Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150; 4: +0,100; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Secção de apoio;
- Modelo de sobrecarga LM2.



Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

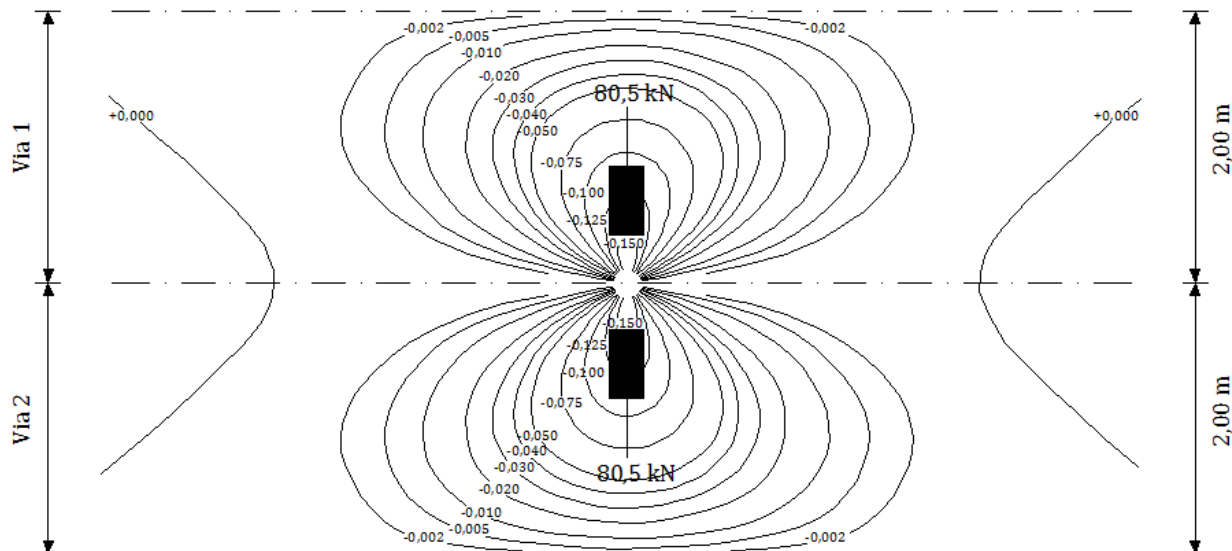
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola
 - Modelo de sobrecarga LM2.



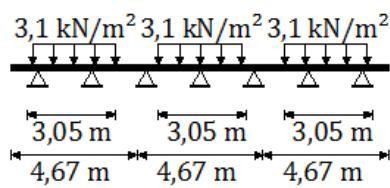
Legenda – 1: +0,440; 2: +0,400; 3: +0,360; 4: +0,320; 5: +0,280.

AASHTO

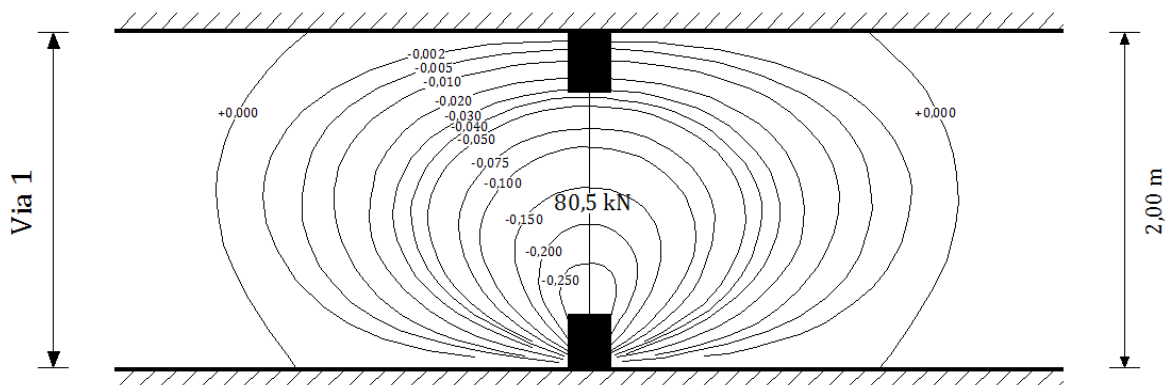
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo HS20 – 44.



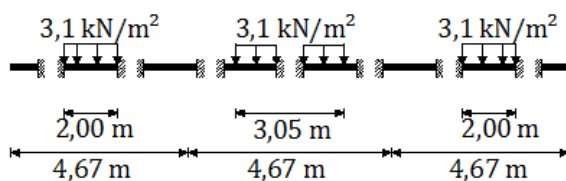
- Sobrecarga uniforme.



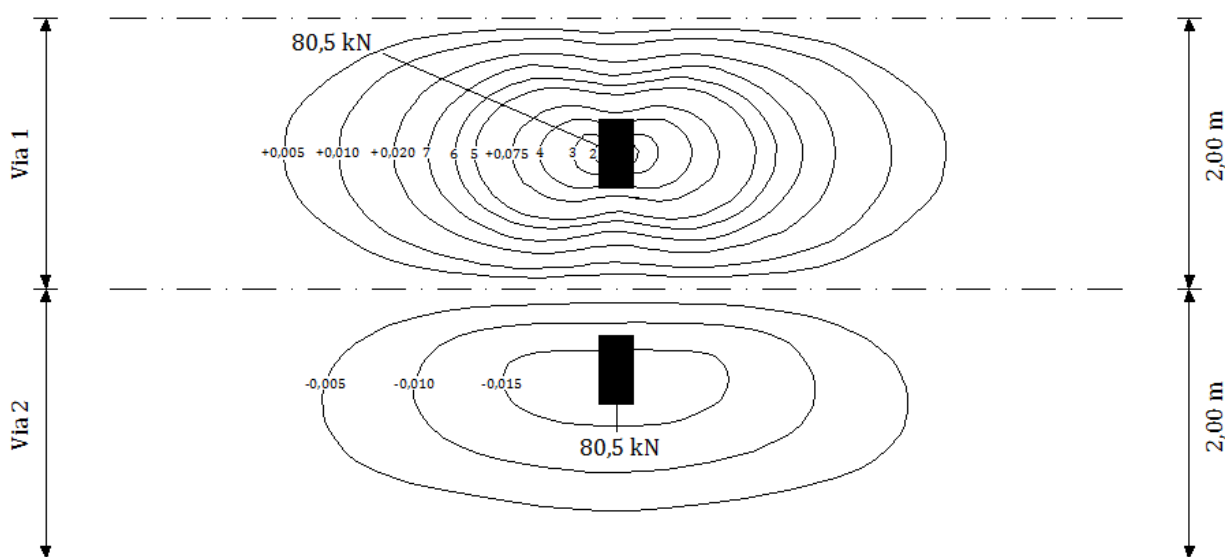
- Secção de apoio;
 - Veículo HS20 – 44.



- Sobrecarga uniforme.

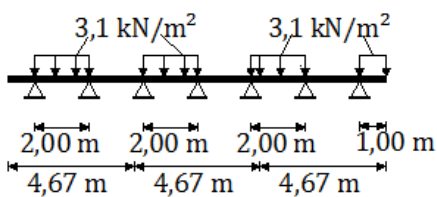


- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo HS20 – 44.

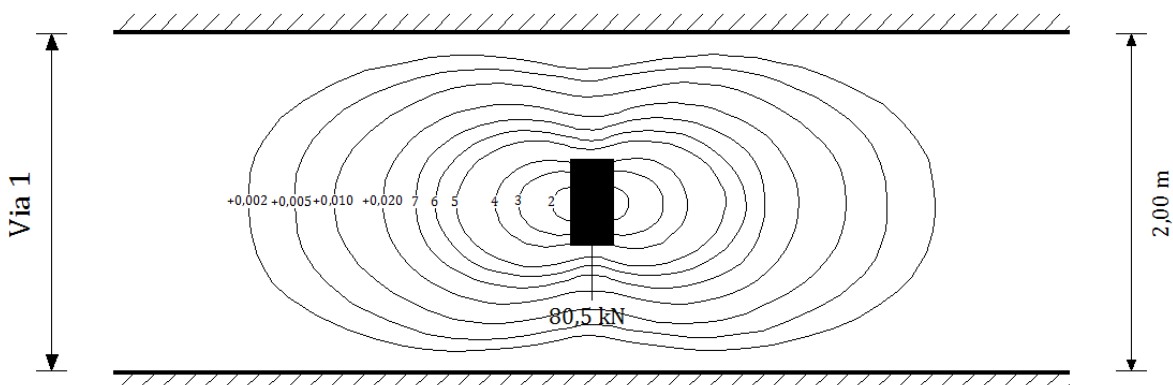


Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150; 4: +0,100; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Sobrecarga uniforme.

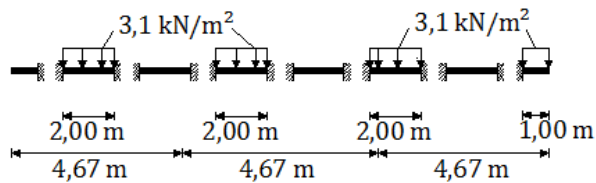


- Secção de apoio;
 - Veículo HS20 – 44.



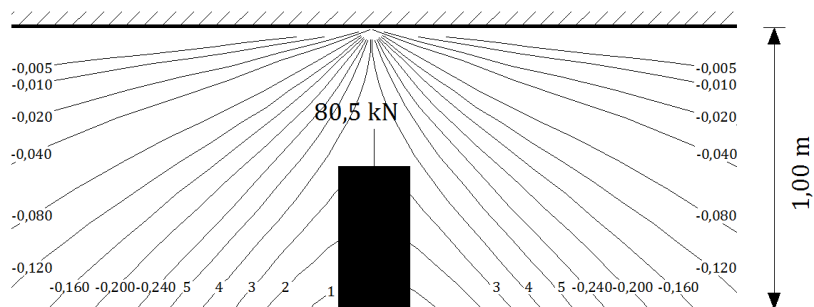
Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,750; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Sobrecarga uniforme.



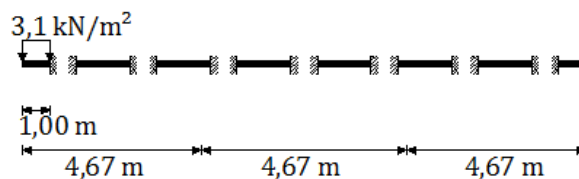
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola

- Veículo HS20 – 44.



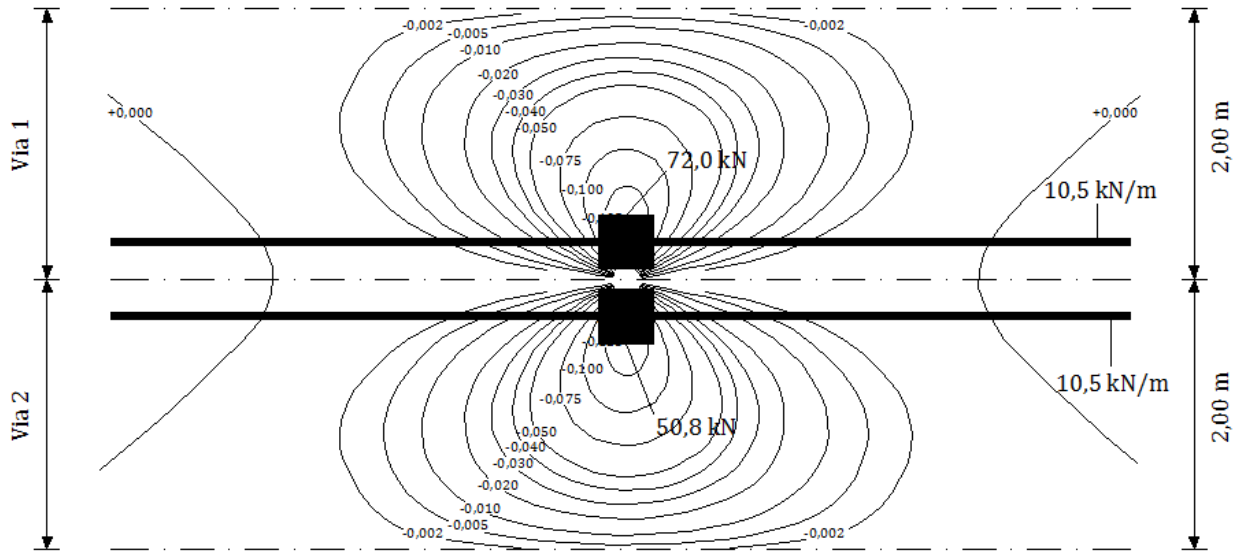
Legenda – 1: +0,440; 2: +0,400; 3: +0,360; 4: +0,320; 5: +0,280.

- Sobrecarga uniforme.



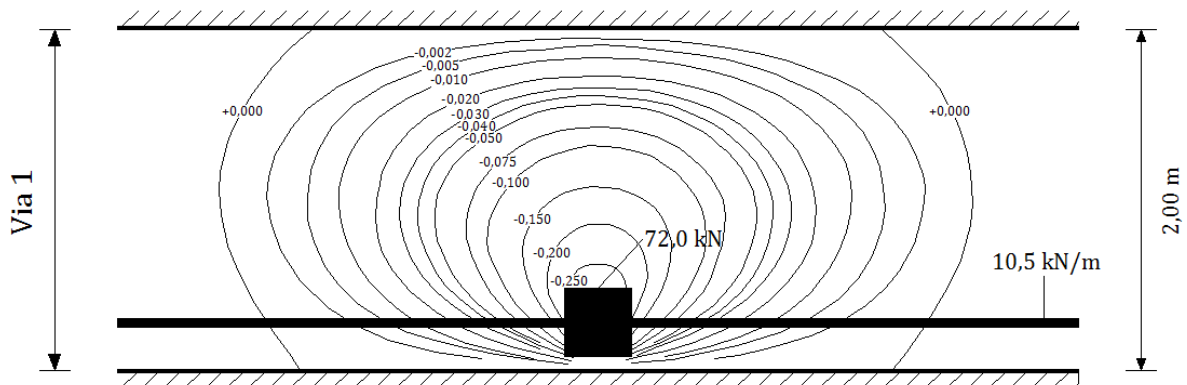
SATCC

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga NA – (1) + (2).

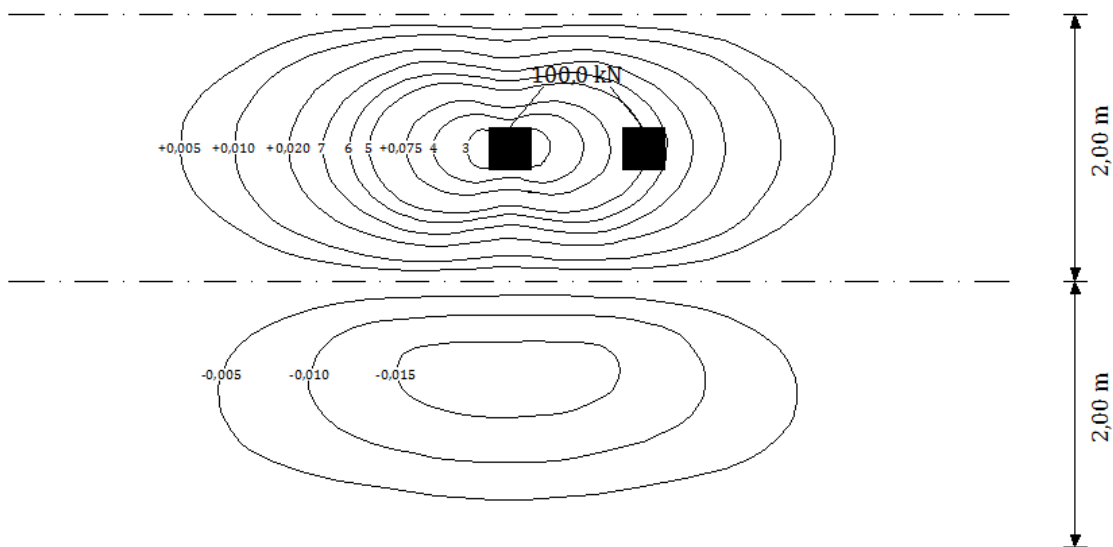


– Secção de apoio.

- Modelo de sobrecarga NA – (1) + (2).

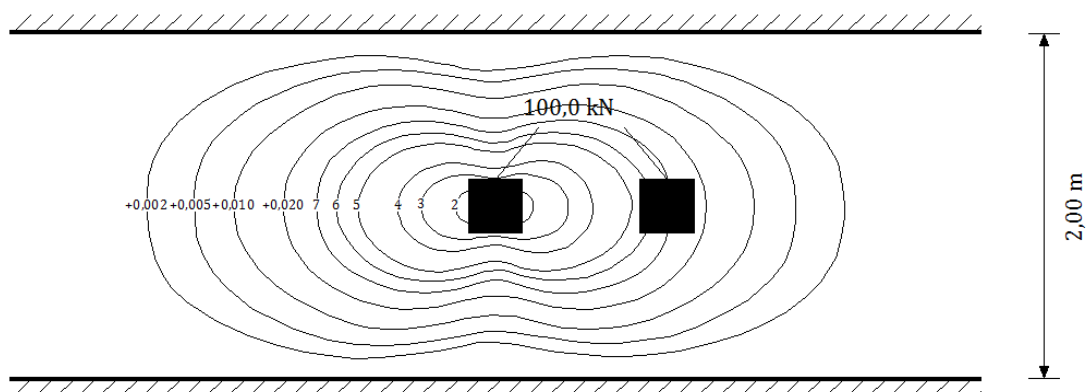


- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga NA – (3).



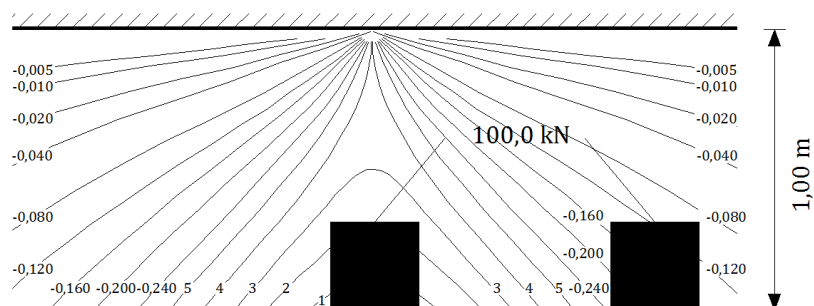
Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150; 4: +0,100; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Secção de apoio;
- Modelo de sobrecarga NA – (3).



Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,750; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

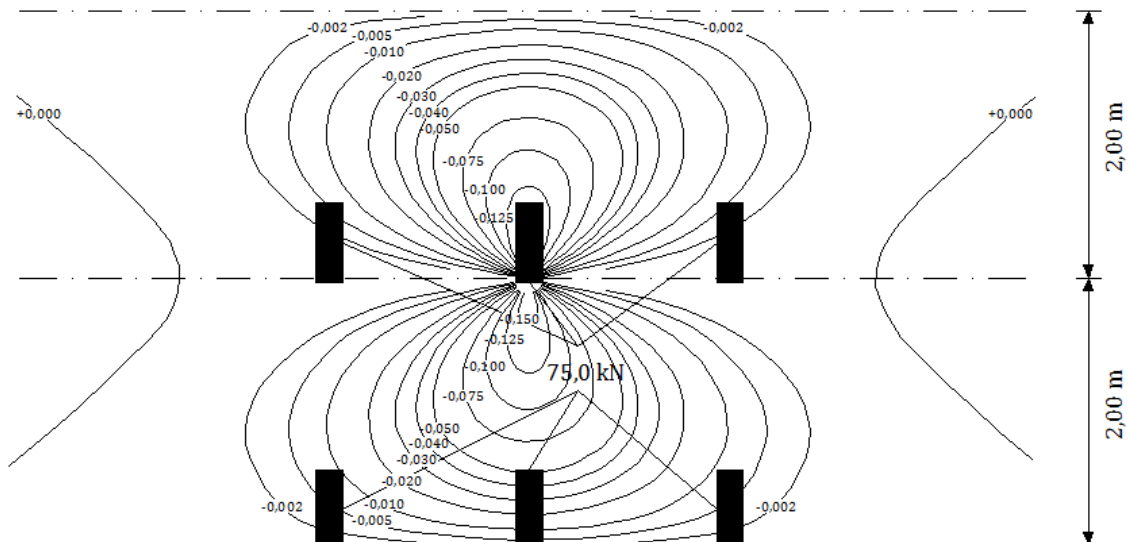
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola
 - Modelo de sobrecarga NA – (3).



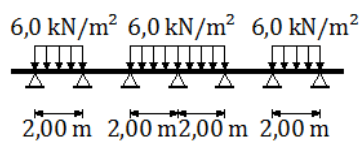
Legenda – 1: +0,440; 2: +0,400; 3: +0,360; 4: +0,320; 5: +0,280.

ABNT

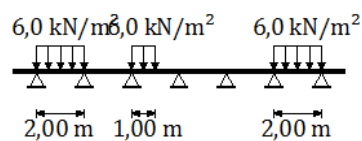
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.



- Sobrecarga uniforme.

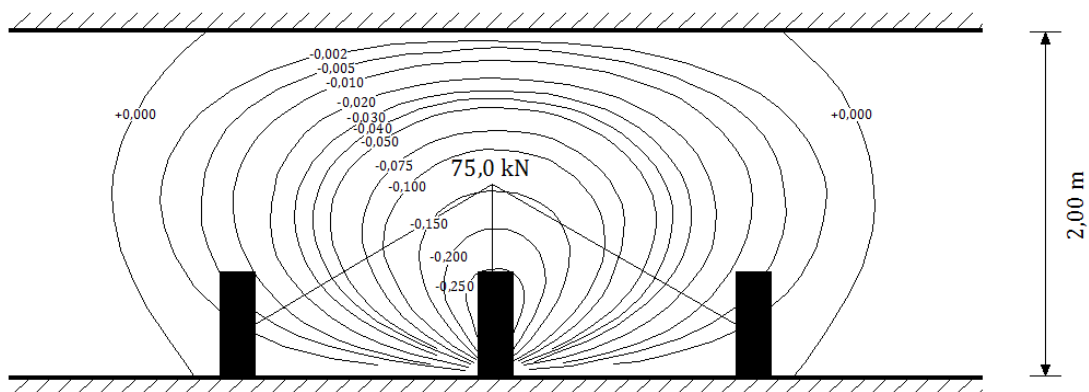


Secção sem veículo

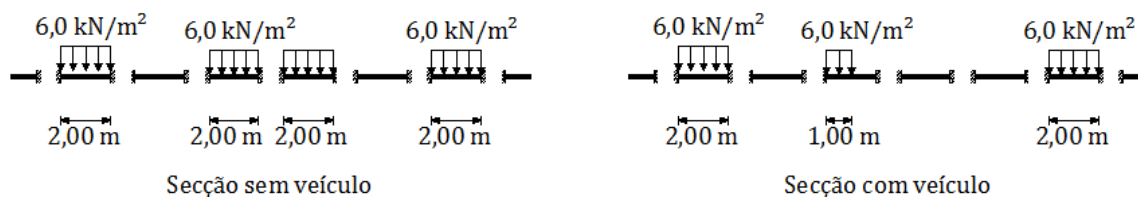


Secção com veículo

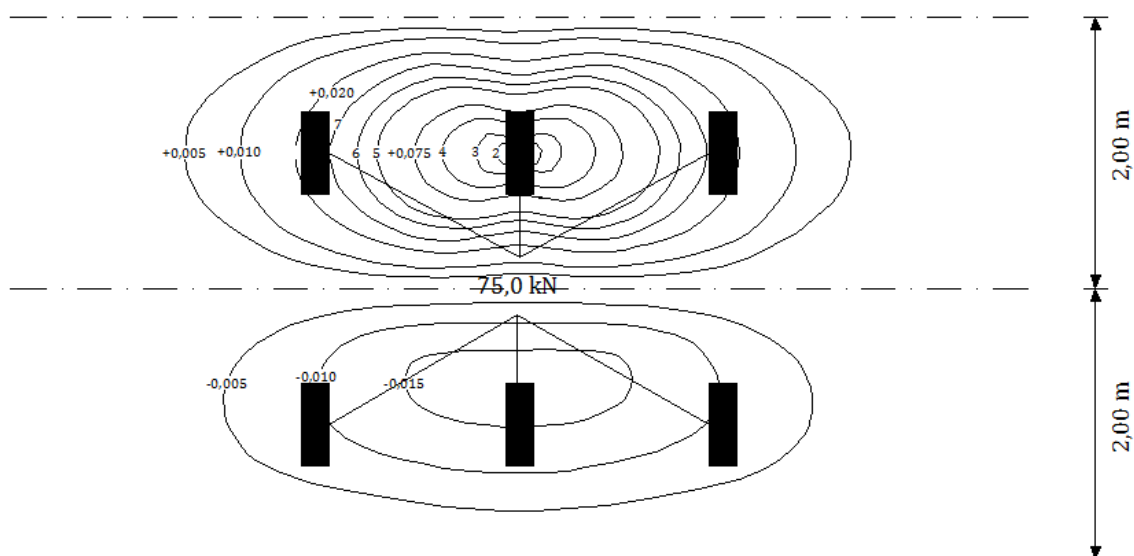
- Secção de apoio;
 - Veículo tipo.



- Sobrecarga uniforme.



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
 - Seção de meio vão;
 - Veículo tipo.

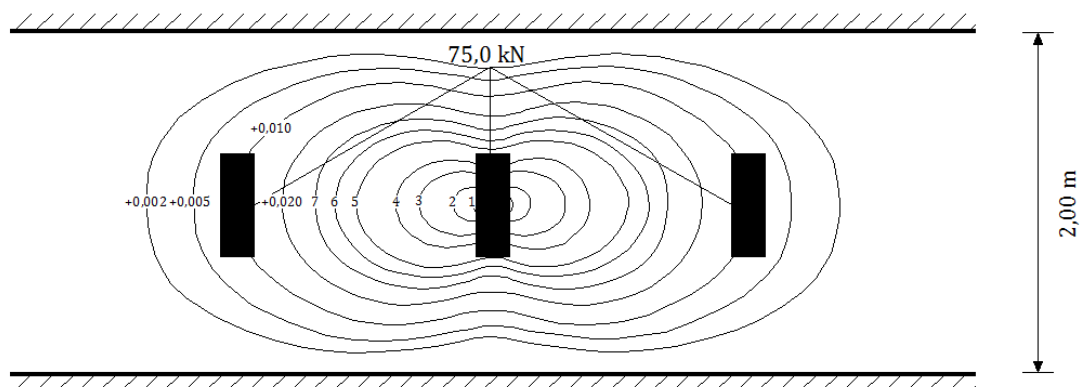


Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150; 4: +0,100; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Sobrecarga uniforme.

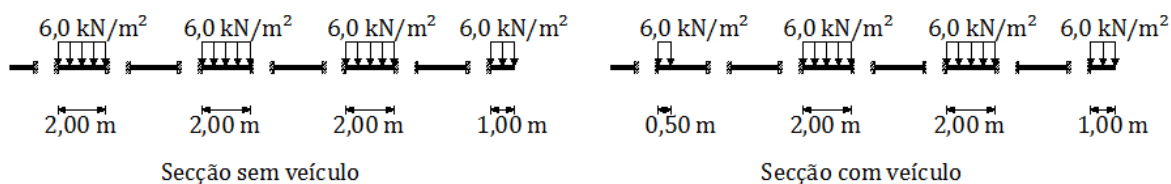


- Secção de apoio;
- Veículo tipo.

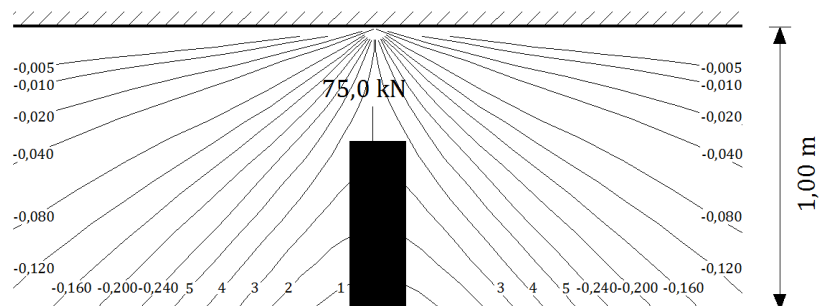


Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,0750; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Sobrecarga uniforme.

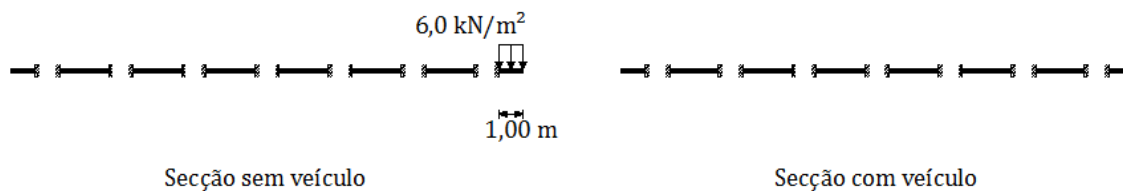


- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola
- Veículo tipo.



Legenda – 1: +0,440; 2: +0,400; 3: +0,360; 4: +0,320; 5: +0,280.

- Sobrecarga uniforme.

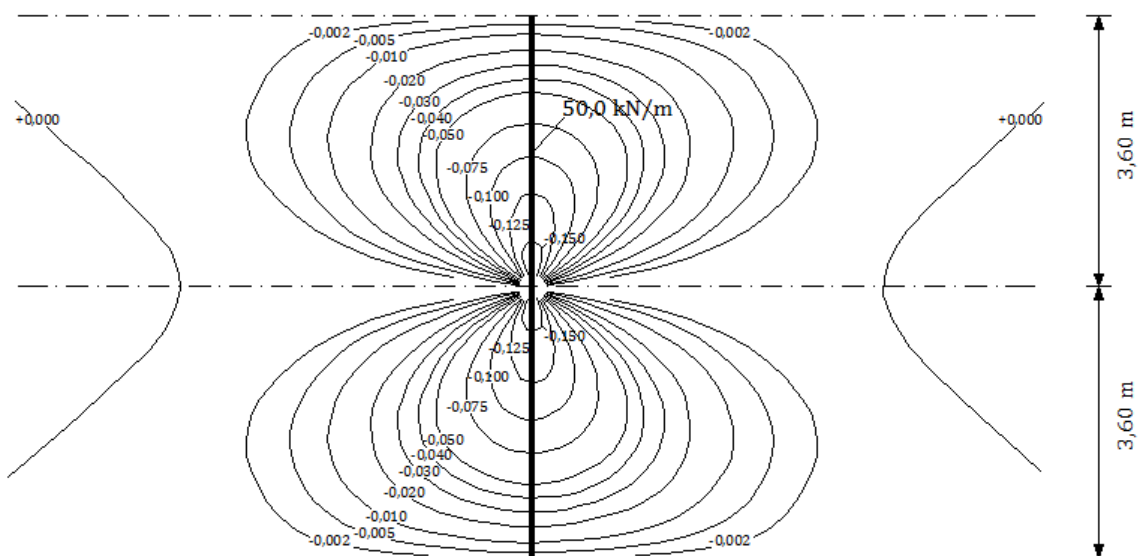


A2.5 – Caso de estudo 5

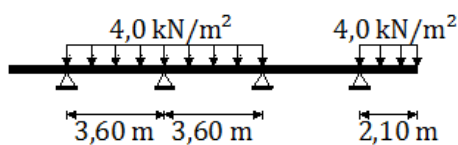
Neste caso de estudo o coeficiente de encastramento parcial α toma o valor de 0. Assim, os resultados obtidos na secção apoiada correspondem aos valores adoptados na secção de meio vão e os resultados obtidos na secção encastrada correspondem aos valores adotados na secção de apoio.

RSA

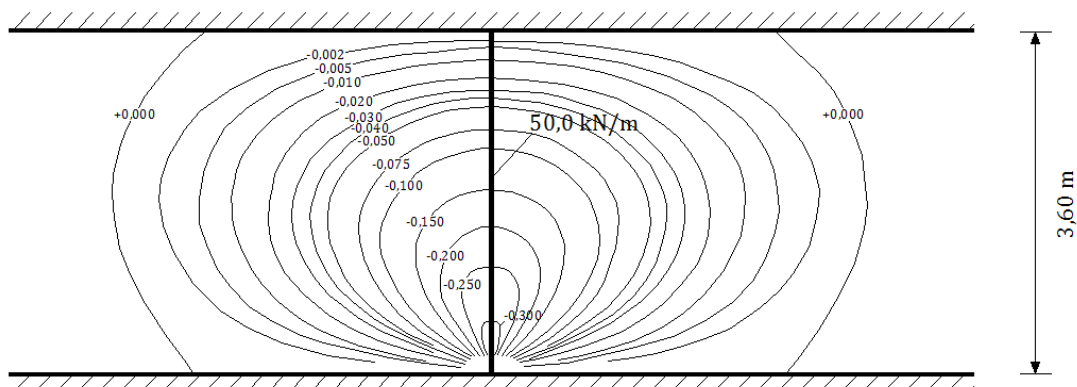
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Sobrecarga linear.



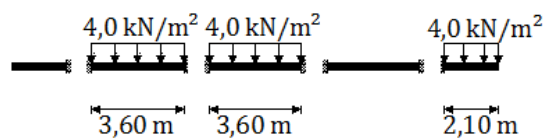
- Sobrecarga uniforme.



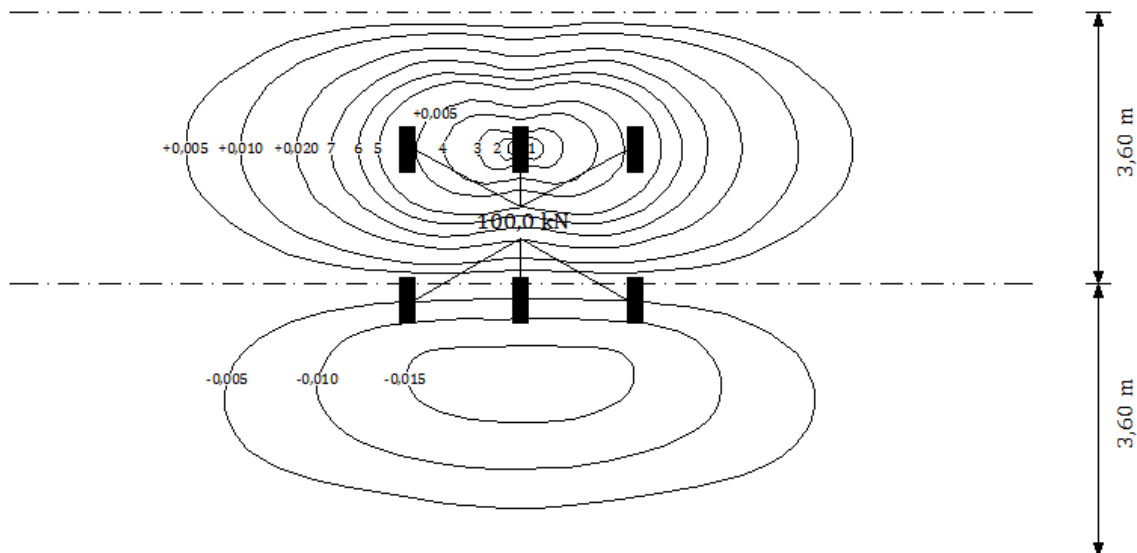
- Secção de apoio;
 - Sobrecarga linear.



- Sobrecarga uniforme.

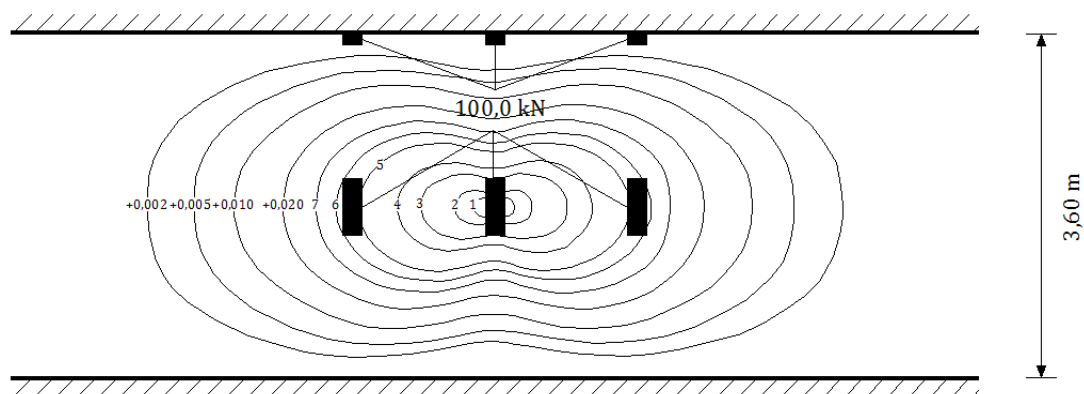


- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.



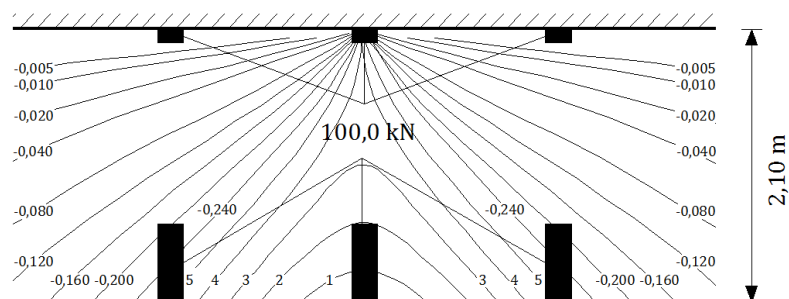
Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150; 4: +0,100; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Secção de apoio;
- Veículo tipo.



Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,750; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

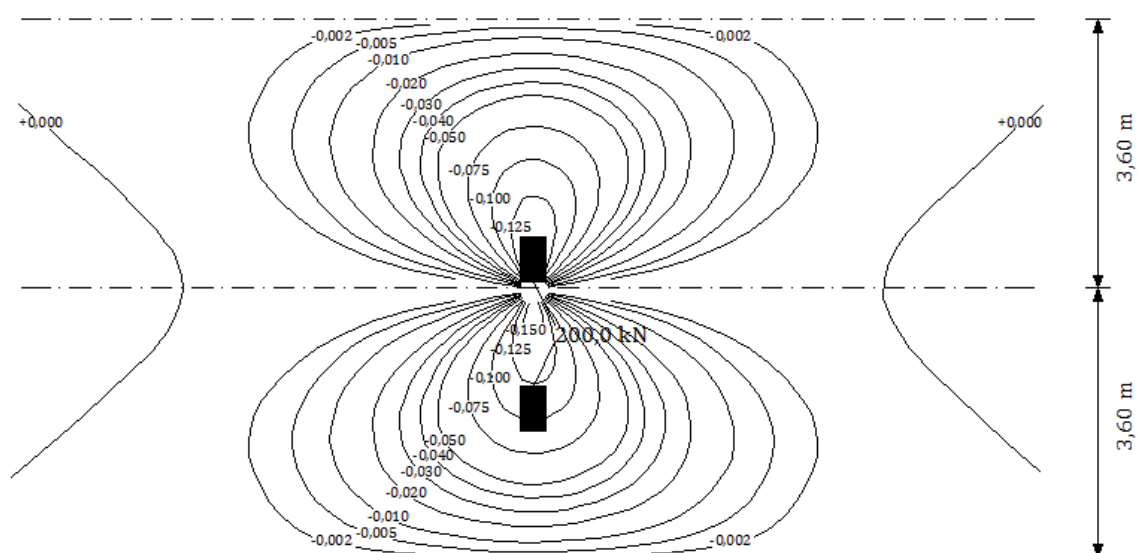
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola
 - Veículo tipo.



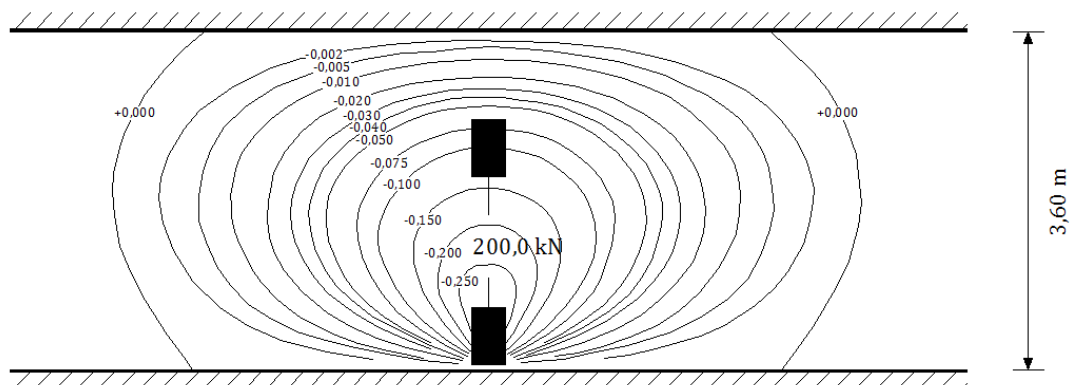
Legenda – 1: +0,440; 2: +0,400; 3: +0,360; 4: +0,320; 5: +0,280.

EC1

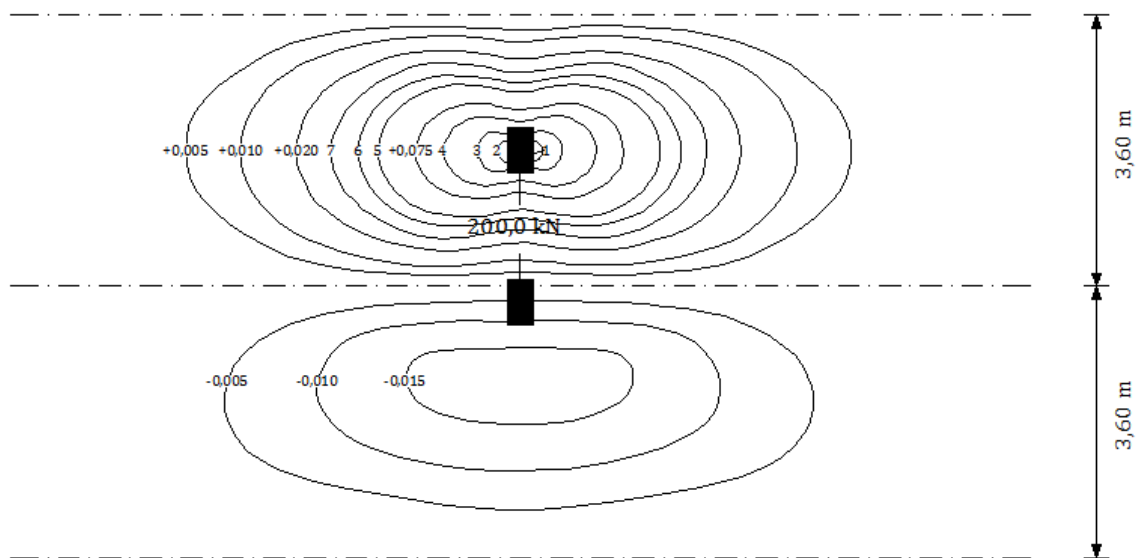
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga LM2.



- Secção de apoio;
- Modelo de sobrecarga LM2.

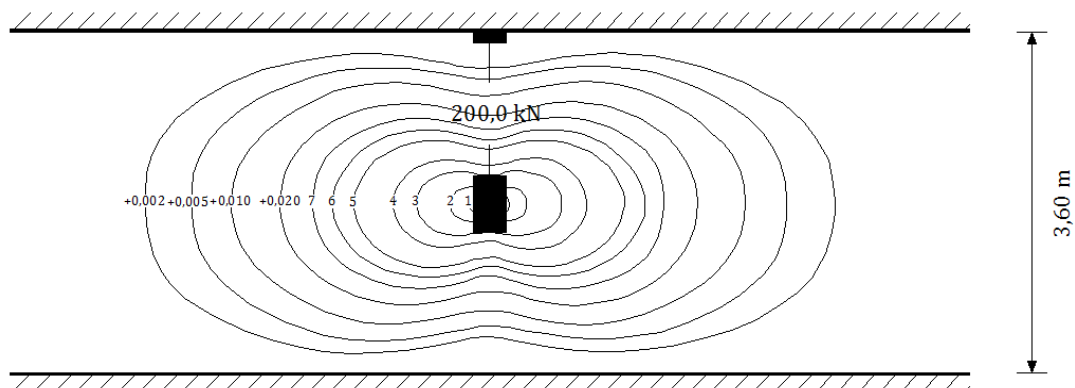


- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga LM2.



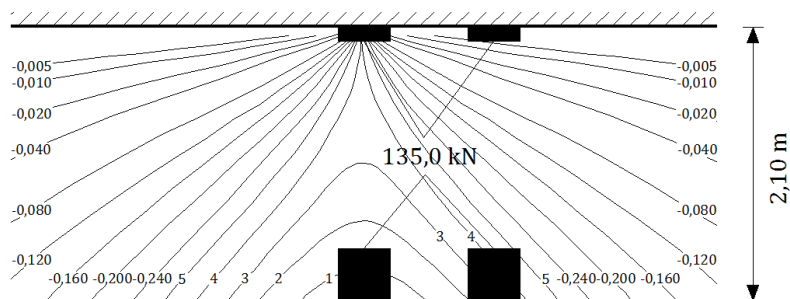
Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150; 4: +0,100; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Secção de apoio;
- Modelo de sobrecarga LM2.



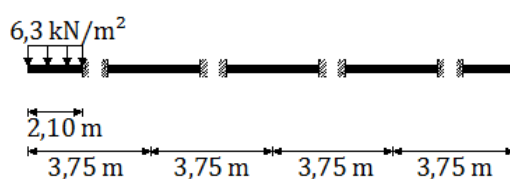
Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,0750; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola
 - Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo TS



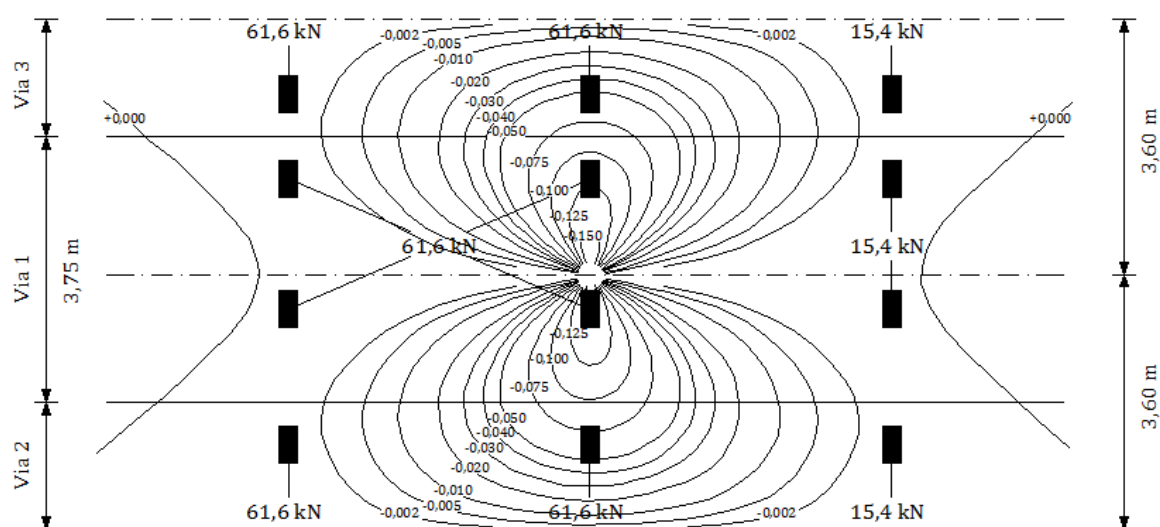
Legenda – 1: +0,440; 2: +0,400; 3: +0,360; 4: +0,320; 5: +0,280.

- Modelo de sobrecarga LM1 – Submodelo UDL

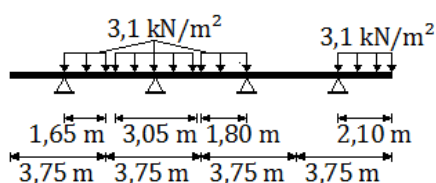


AASHTO

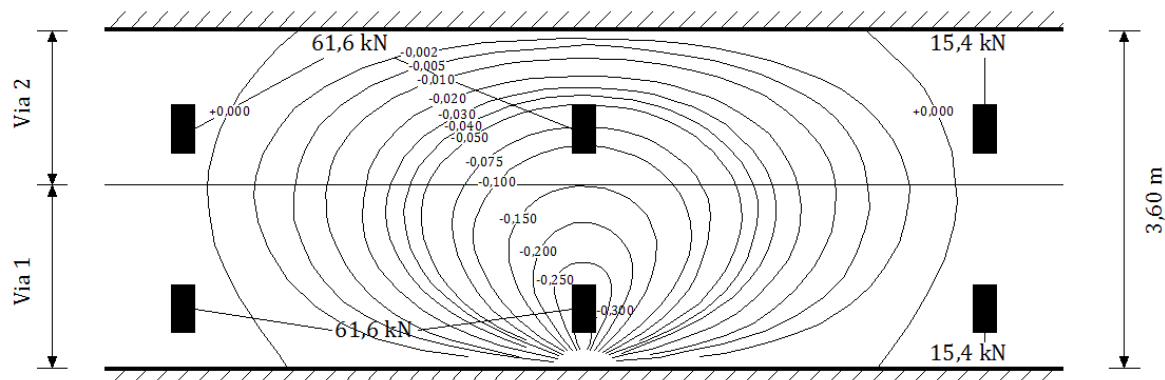
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo HS20 – 44.



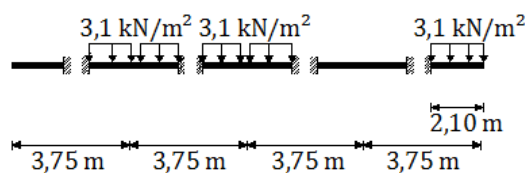
- Sobrecarga uniforme.



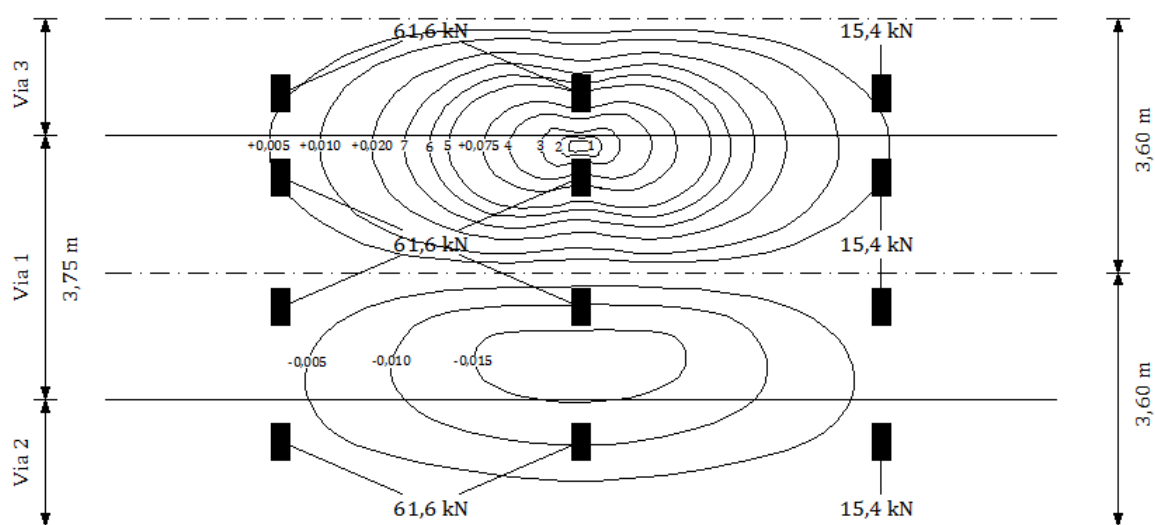
- Secção de apoio;
- Veículo HS20 – 44.



- Sobrecarga uniforme.

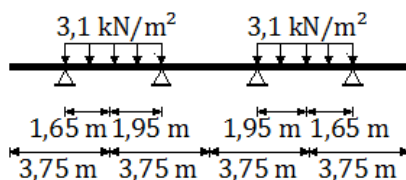


- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo HS20 – 44.

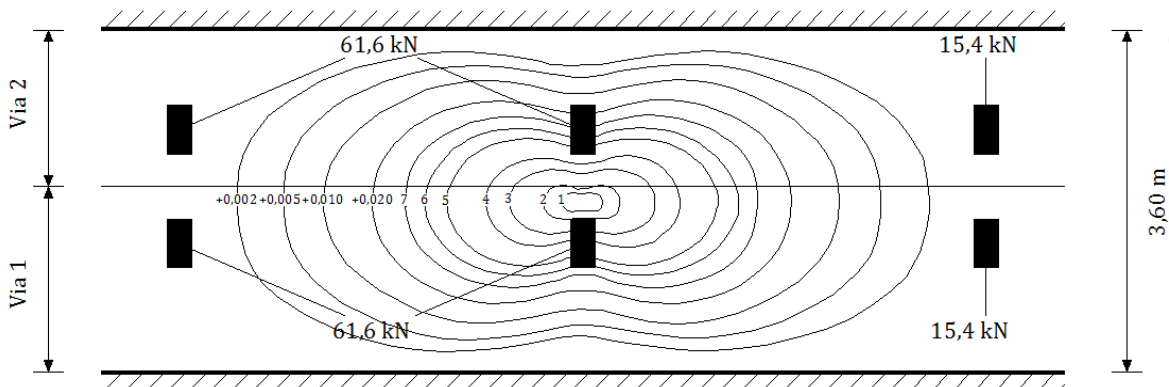


Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150; 4: +0,100; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Sobrecarga uniforme.

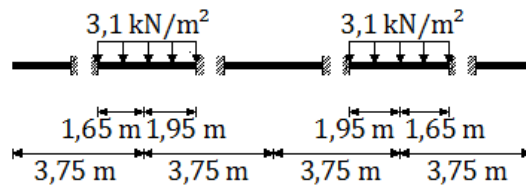


- Secção de apoio;
- Veículo HS20 – 44.

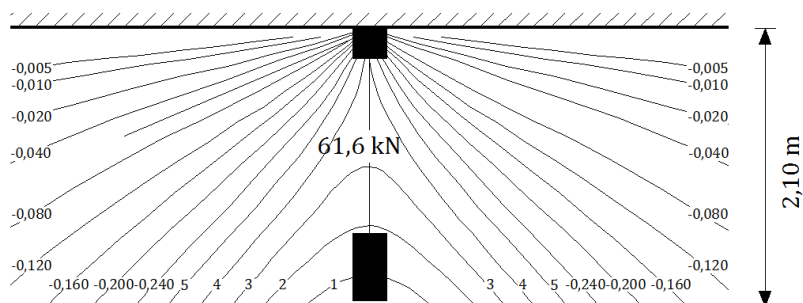


Legenda - 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,750; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Sobrecarga uniforme.

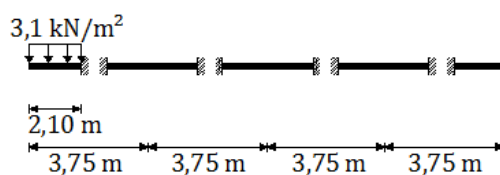


- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola
 - Veículo HS20 - 44.



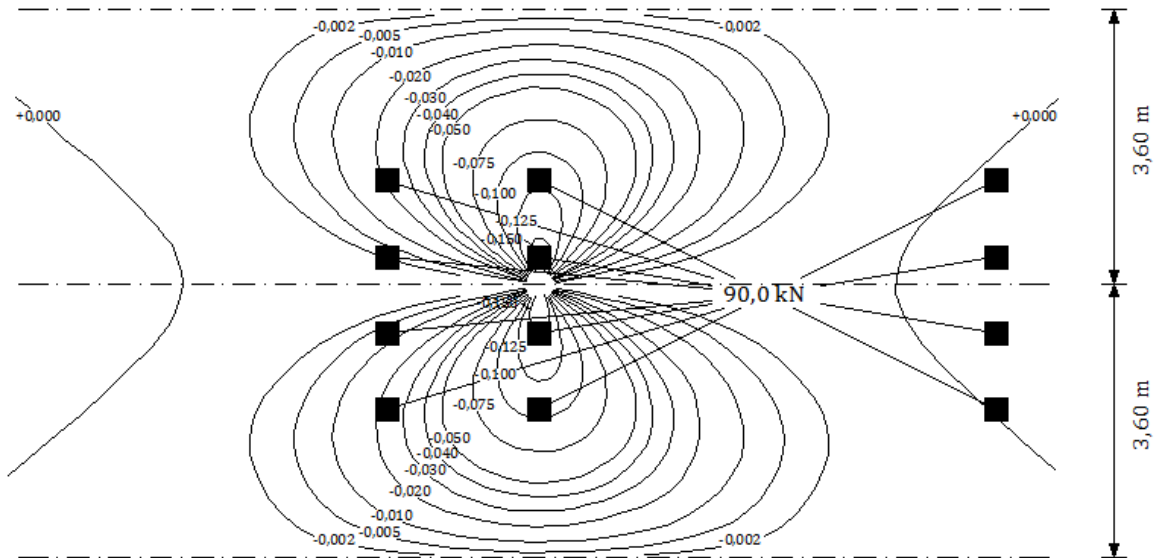
Legenda - 1: +0,440; 2: +0,400; 3: +0,360; 4: +0,320; 5: +0,280.

- Sobrecarga uniforme.

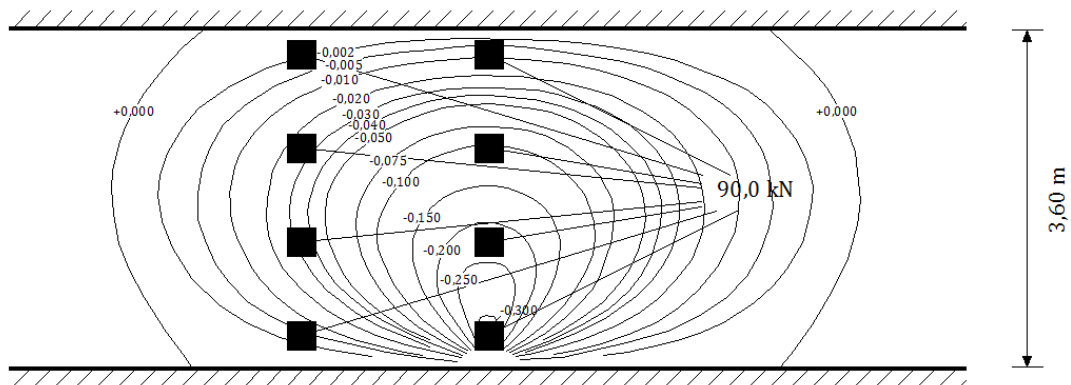


SATCC

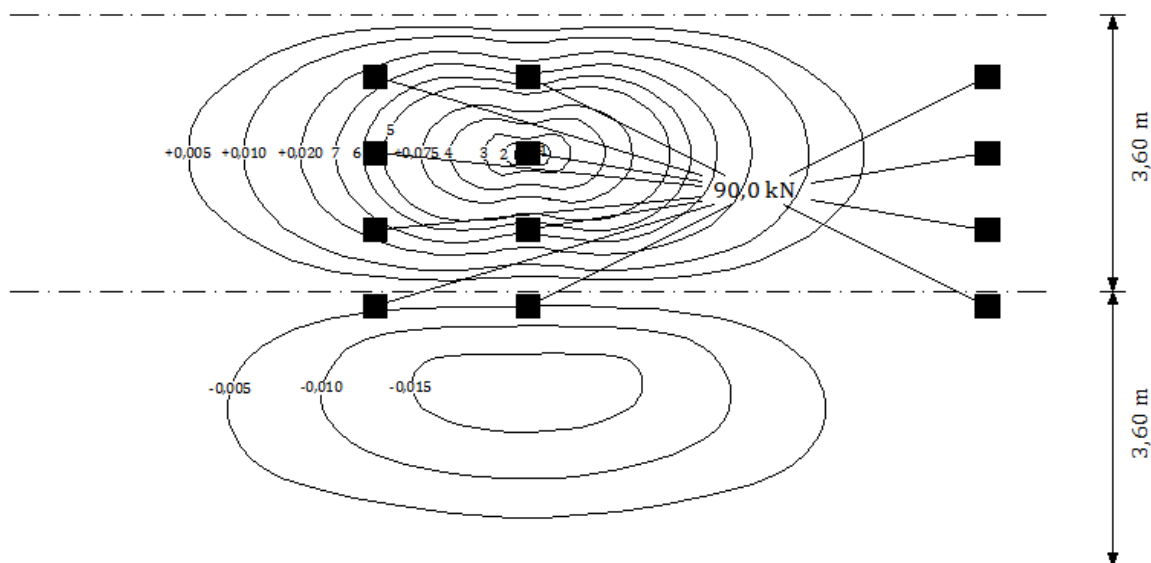
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga NB.



- Secção de apoio;
 - Modelo de sobrecarga NB.

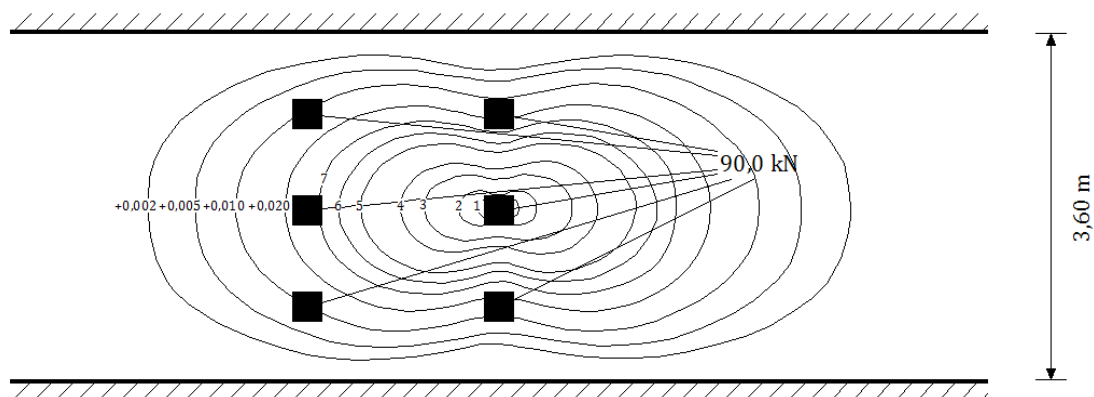


- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Modelo de sobrecarga NB.



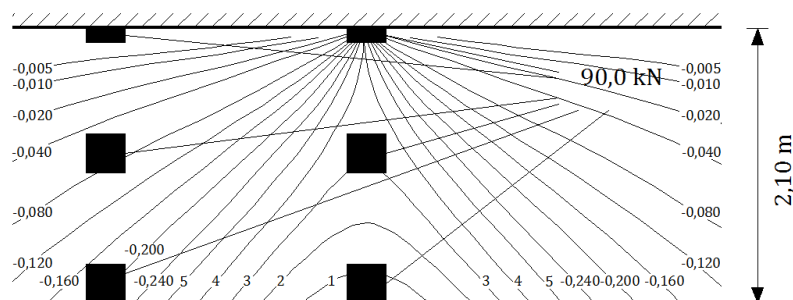
Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150; 4: +0,100; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Secção de apoio;
- Modelo de sobrecarga NB.



Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,0750; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

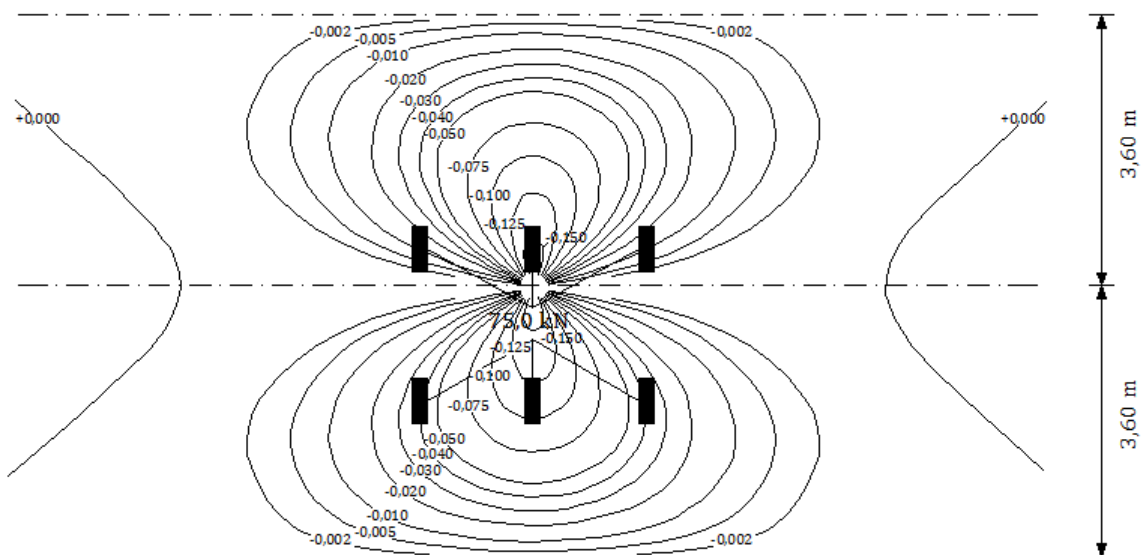
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola
 - Modelo de sobrecarga NB.



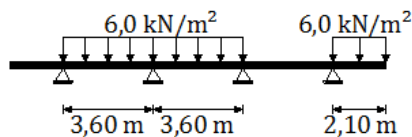
Legenda – 1: +0,440; 2: +0,400; 3: +0,360; 4: +0,320; 5: +0,280.

ABNT

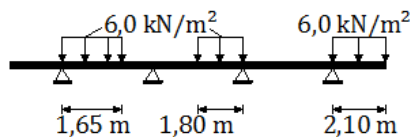
- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na laje entre vigas
 - Secção de meio vão;
 - Veículo tipo.



- Sobrecarga uniforme.

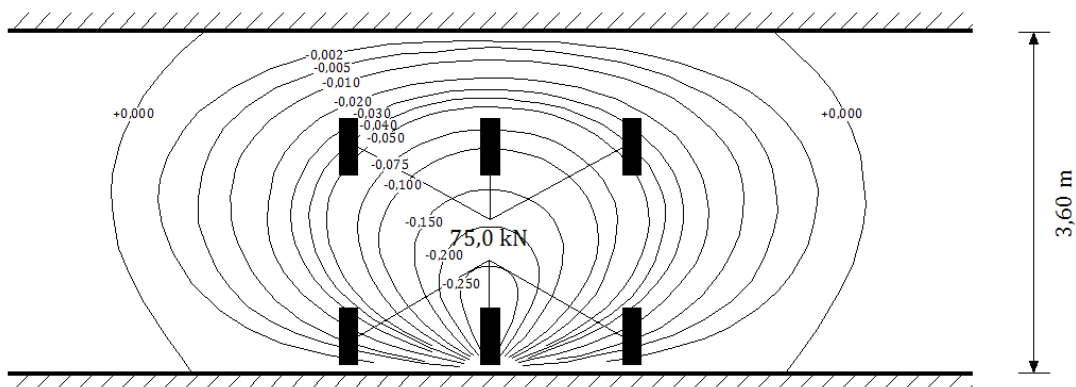


Secção sem veículo

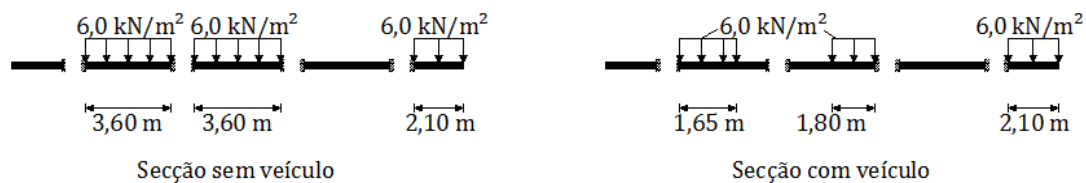


Secção com veículo

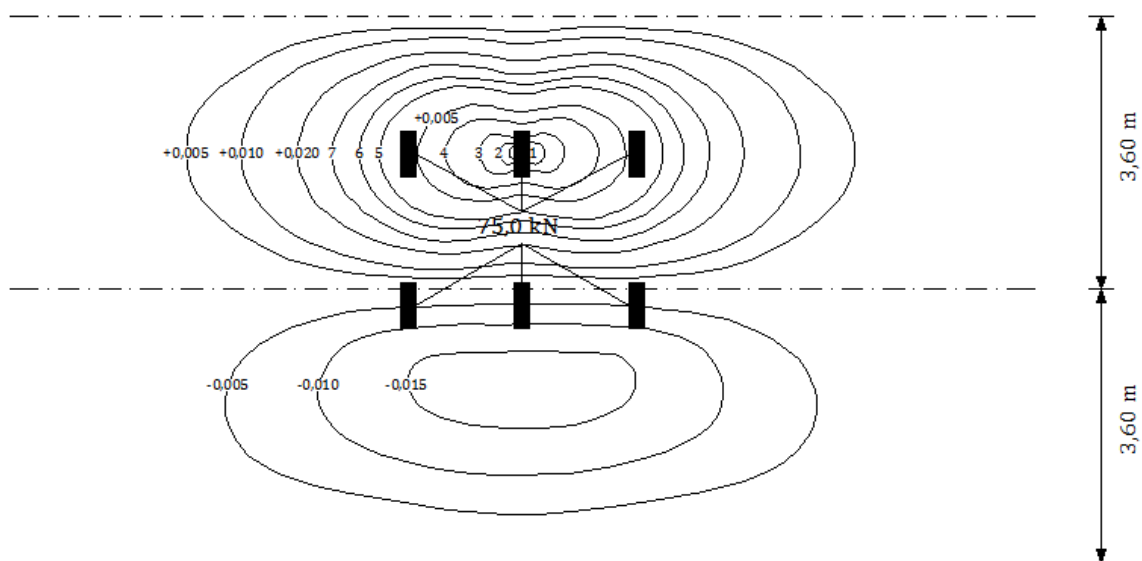
- Secção de apoio;
 - Veículo tipo.



- Sobrecarga uniforme.



- Carregamento condicionante do momento fletor positivo na laje entre vigas
 - Seção de meio vão;
 - Veículo tipo.

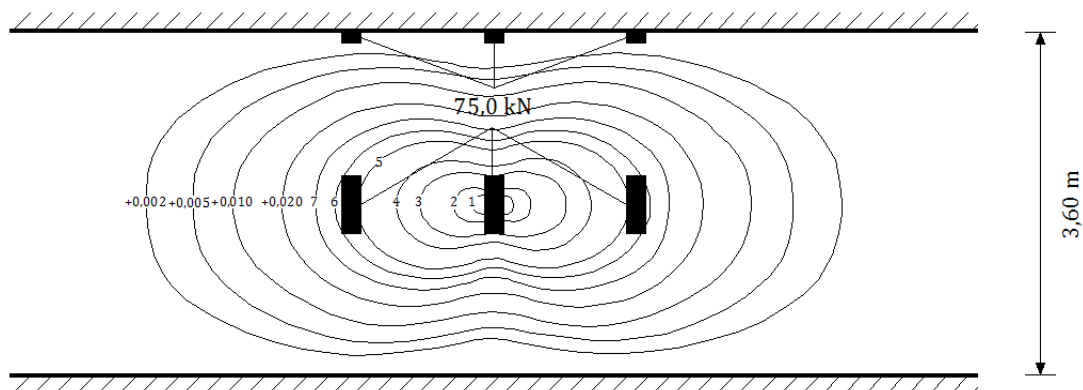


Legenda – 1: +0,250; 2: +0,200; 3: +0,150; 4: +0,100; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Sobrecarga uniforme.

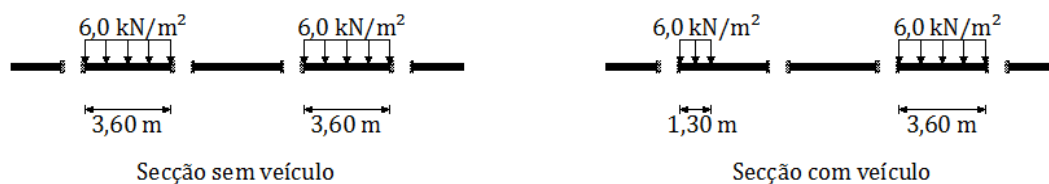


- Secção de apoio;
- Veículo tipo.

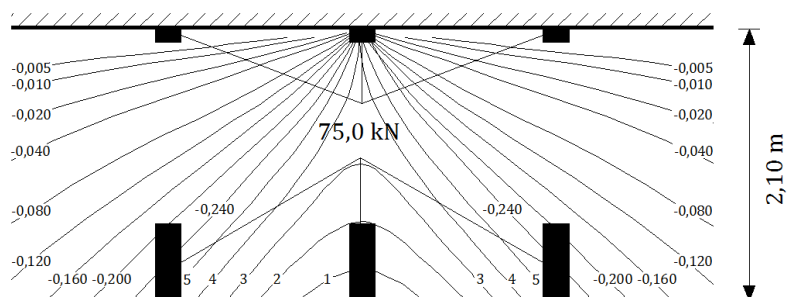


Legenda – 1: +0,200; 2: +0,150; 3: +0,100; 4: +0,075; 5: +0,050; 6: +0,040; 7: +0,030.

- Sobrecarga uniforme.



- Carregamento condicionante do momento fletor negativo na consola
- Veículo tipo.



Legenda – 1: +0,440; 2: +0,400; 3: +0,360; 4: +0,320; 5: +0,280.

- Sobrecarga uniforme.

